

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ФИЗИКИ ЧАСТИЦ

Научный семинар, посвященный
85-летнему юбилею профессора И. А. Голутвина

Дубна, 8 августа 2019 г.

Труды

Дубна • 2021

Экспериментальные методы физики частиц: Труды научного семинара, Э41 посвященного 85-летнему юбилею профессора И. А. Голутвина (Дубна, 8 авг. 2019 г.). — Дубна: ОИЯИ, 2021. — 103 с.

ISBN 978-5-9530-0563-0

Содержание

Предисловие	4
М.Г. Иткис. Открытие	5
Р. Карлин. CMS: успешное сотрудничество, направленное в будущее	10
А.В. Зарубин. Методы эксперимента: взгляд в будущее	24
М. Гузевич. Бозон Хиггса: открытие, изучение и будущее	46
П. де Барбаро. Калориметрия CMS: прошлое и будущее.....	59
О.В. Теряев. Спиновая и Новая физика на CMS	70
И.М. Дрёмин. Ультрапериферические ядерные взаимодействия: эксперимент и теория.....	76
Встречи с друзьями и коллегами.....	81

Предисловие

8 августа 2019 г. в Доме международных совещаний ОИЯИ в Дубне состоялся научный семинар «Экспериментальные методы физики частиц», посвященный 85-летию выдающегося российского ученого Игоря Анатольевича Голутвина.

В работе семинара приняли участие ряд известных ученых как из России, так и из-за рубежа. С докладами выступили: Михаил Иткис (вице-директор ОИЯИ), Роберто Карлин (руководитель коллаборации CMS), Анатолий Зарубин (начальник научно-экспериментального отдела физики на CMS, ОИЯИ), Максим Гузевич (ведущий научный сотрудник Университета Лиона), Павел де Барбаро (ведущий научный сотрудник из Рочестерского университета, США), Игорь Дремин (заведующий лабораторией физики высоких энергий ФИАН), Олег Теряев (начальник научно-экспериментального отдела физики столкновений тяжелых ионов на комплексе NICA ОИЯИ).

В основном доклады были посвящены методическим разработкам для установки CMS и физическим результатам, полученным на этой установке. Наиболее значительным результатом явилось открытие бозона Хиггса совместно с коллаборацией ATLAS. Обсуждались предложения по дальнейшей модернизации установки и программе физических исследований. Во всех докладах был отмечен огромный вклад И.А. Голутвина в создание крупнейшего детектора CMS на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН.

Игорь Анатольевич успешно руководил и продолжает руководить группой из Дубны и коллаборацией RDMS (Russia and Dubna Member States), которые участвовали в создании большинства детекторов установки CMS, а в настоящее время занимаются её модернизацией.

В приветственном выступлении М.Г. Иткиса и в докладе А.В. Зарубина также отмечены заслуги профессора И.А. Голутвина в предыдущие годы, до создания установки CMS.

Игорь Анатольевич Голутвин после окончания в 1957 году Московского физико-технического института был направлен на работу в НПО «Алмаз», носящее ныне имя академика А.А. Расплетина. Он стал учеником Расплетина и занимался под его руководством исследованиями подавления пассивных помех, разработкой аппаратуры селекции движущихся целей и созданием зенитной ракетной системы.

В Объединенный институт ядерных исследований Игорь Анатольевич Голутвин перешел на работу в 1958 году из СКБ при Сухумском физико-техническом институте, после завершения создания опытного образца «безжелезного» синхротрона.

В Объединенном институте ядерных исследований И.А. Голутвиным были выполнены уникальные работы по автоматизации обработки камерных снимков, по созданию первых блоков быстрой электроники на транзисторах, проведены пионерские работы по методике искровых камер. Были выполнены первый в СССР онлайн эксперимент на синхрофазотроне по пион-протонному рассеянию на малые углы в области кулон-ядерной интерференции и эксперимент по регенерации каонов на У-70 в Протвино. Большой вклад им был сделан в эксперимент НА4 (первый совместный эксперимент ОИЯИ-ЦЕРН), для которого под его руководством была разработана система уникальных пропорциональных камер.

Последние четверть века И.А. Голутвин руководил разработкой и созданием установок для новых ускорительно-накопительных комплексов Большого адронного коллайдера в ЦЕРН и ускорителя HERA в Германии.

Все работы Игоря Анатольевича Голутвина оказали большое влияние на общий уровень методики физического эксперимента в мире.

В этом сборнике представлены слайды докладов, сделанных на юбилейном семинаре, с добавлением небольших комментариев для пояснения содержания слайдов.

М.Г.Иткис

Вице-директор ОИЯИ



Открытие

On celebration of the 85th Jubilee of Prof. I.A. Golutvin

- Голутвин Игорь Анатольевич – выдающийся ученый, крупный специалист, основатель нового направления и новых методов исследования в области физики элементарных частиц, методики и техники физического эксперимента, автор более 950 научных работ и трех изобретений, его авторитет признан на мировом уровне.
- Под руководством Голутвина И.А. создано несколько поколений современных крупномасштабных физических установок для экспериментов на синхрофазотроне Объединенного института ядерных исследований в Дубне, ускорителе Института физики высоких энергий в Серлухове, на протонном синхротроне и Большом алронном коллайдере международного европейского центра ЦЕРН в Женеве.
- Эти работы оказали большое влияние на общий уровень методики физического эксперимента.

A portrait of Prof. I.A. Golutvin, an elderly man with grey hair and glasses, wearing a light blue button-down shirt. He is gesturing with his right hand while speaking.

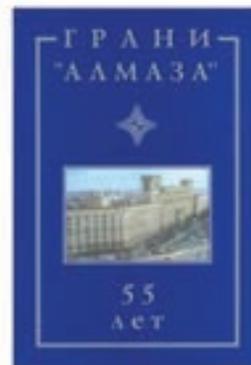
M. Itkis Opening of Scientific Seminar dedicated 85th Jubilee of Professor I.A. Golutvin, Dubna, 8 August 2019

On celebration of the 85th Jubilee of Prof. I.A. Golutvin



Начало научного пути

- Игорь Анатольевич Голутвин родился 8 августа 1934 года в городе Москве.
- В 1951 году окончил среднюю школу с золотой медалью и поступил в Московский физико-технический институт.
- Во время учебы и после окончания МФТИ в 1957 году работал в организации, ныне известной как «НПО имени академика А.А.Расплетина», где принимал участие в исследовании подавления пассивных помех, разработке аппаратуры селекции движущихся целей и создании зенитной ракетной системы.
- В 1958 году, после завершения создания опытного образца «безжелезного» синхротрона в СКБ при Сухумском физико-техническом институте, перешел на работу в Объединенный институт ядерных исследований.



M.Itkis Opening of Scientific Seminar dedicated 85th Jubilee of Professor I.A.Golutvin, Dubna, 8 August 2019

Научный путь И.А. Голутвина до начала работы в ОИЯИ.

On celebration of the 85th Jubilee of Prof. I.A. Golutvin



ОИЯИ

1958

- Автоматизация обработки камерных снимков
- Первые блоки быстрой электроники на транзисторах

60-е

- Пионерские работы по методике искровых камер
- Первый в СССР on-line эксперимент на синхрофазотроне по пион-протонному рассеянию на малые углы в области кулон-ядерной интерференции
- Эксперимент по регенерации каонов на У-70 в Протвино

70-е

- Диагностика пучков КУТИ
- НА4 - первый совместный эксперимент ОИЯИ-ЦЕРН

80-е

- Эксперименты Нейтринный детектор, Сигма, Аномалон, Меченые нейтрино, SMC и многие другие на синхрофазотроне в ОИЯИ, У-70 в ИФВЭ, СПС ЦЕРН

90-е

- Начало экспериментальных программ на суперколлайдерах

2000-е

- Подготовка и запуск экспериментального комплекса CMS на Большом адронном коллайдере



M.Itkis Opening of Scientific Seminar dedicated 85th Jubilee of Professor I.A.Golutvin, Dubna, 8 August 2019

Этапы деятельности Игоря Анатольевича от автоматической обработки камерных снимков до запуска одного из крупнейших детекторов в мире.



□ **В последние четверть века Голутвин И.А. руководил разработкой и созданием установок для новых ускорительно–накопительных комплексов (LHC в ЦЕРН, HERA в Германии),**

- которые представляют уникальную возможность получить ответы на многие фундаментальные вопросы современной физики частиц
- которые привели к открытию бозона Хиггса в 2012.

M.Itkis Opening of Scientific Seminar dedicated 85th Jubilee of Professor I.A.Golutvin, Dubna, 8 August 2019

Последнюю четверть века И.А. Голутвин руководил созданием установок для крупнейших ускорительных комплексов мира.



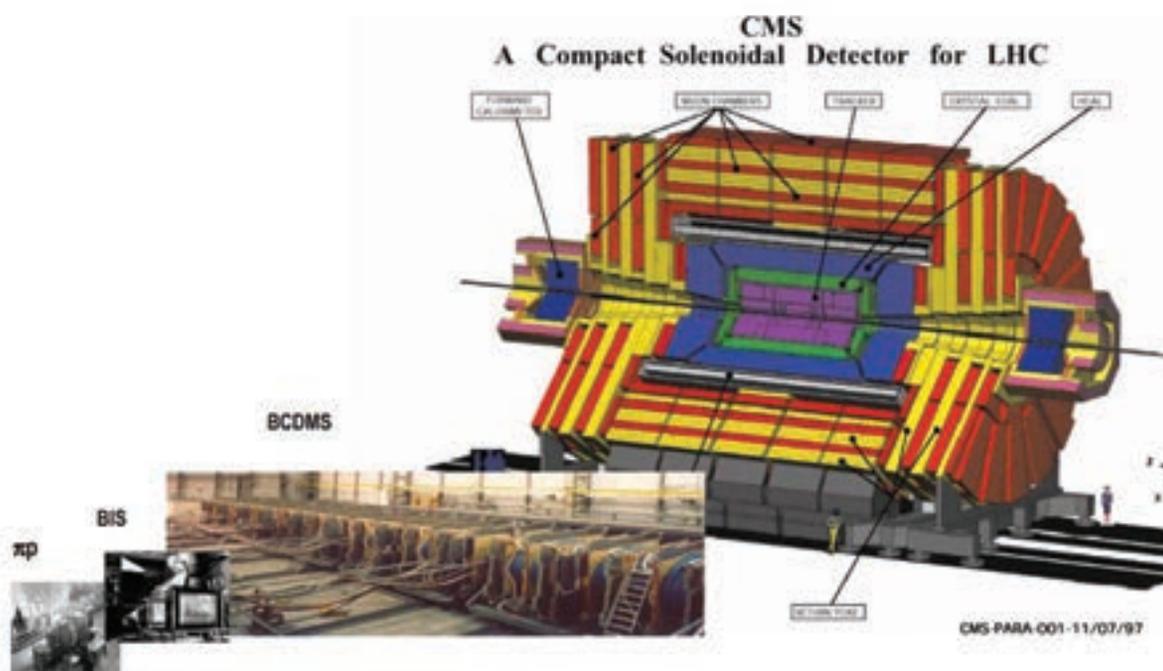
□ **Голутвин И.А. является одним из инициаторов проекта экспериментального комплекса CMS (Компактный мюонный соленоид)**

- многоцелевого детектора, крупнейшего из когда-либо создаваемых установок, объединяющего ученых и инженеров из 31 страны и ориентированного на открытие Хиггсовского бозона, проверку Стандартной модели и поиску новых явлений в области сверхвысоких энергий.
- органической и неотъемлемой частью этого проекта является сотрудничество CMS России и других стран–участниц ОИЯИ RDMS CMS, созданное под научным руководством Голутвина И.А., объединившее около 300 ученых и основанное на широком вовлечении промышленности и потенциала отраслевой науки участвующих стран.

M.Itkis Opening of Scientific Seminar dedicated 85th Jubilee of Professor I.A.Golutvin, Dubna, 8 August 2019

Роль И.А. Голутвина в создании экспериментального комплекса CMS.

Scale of the progress



M. Itkis Opening of Scientific Seminar dedicated 85th Jubilee of Professor I.A. Golutvin, Dubna, 8 August 2019

От небольших экспериментальных установок – до огромных!

On celebration of the 85th Jubilee of Prof. I.A. Golutvin



- **Голутвин И.А. за время своей работы в ОИЯИ создал научную школу, научно-методическое отделение и воспитал коллектив активных и квалифицированных физиков и инженеров, труды которых пользуются широким признанием в нашей стране и за рубежом.**
- Голутвин И.А. являлся заместителем председателя диссертационного совета при Лаборатории. Он подготовил 4 докторов и 14 кандидатов наук, в том числе 2 докторов и 3 кандидатов за последние годы, и осуществляет научное руководство группой аспирантов.
- Голутвин И.А. объединил в рамках сотрудничества CMS России и других стран-участниц ОИЯИ физиков, поставивших перед собой цель сохранить для России научные школы, уникальные коллективы инженеров и физиков и создал благоприятные условия для привлечения одаренных молодых физиков.
- По инициативе И.А.Голутвина от 3 до 10 студентов, аспирантов и молодых ученых ежегодно стажировались в ЦЕРН по программе CMS, где приобретают профессиональное мастерство в научных, технических и социальных областях деятельности и демонстрируют способность эффективно работать в больших международных коллаборациях.
- Это чрезвычайно важно для осуществления долгосрочных научных проектов в России

M. Itkis Opening of Scientific Seminar dedicated 85th Jubilee of Professor I.A. Golutvin, Dubna, 8 August 2019

И.А. Голутвин за время работы в ОИЯИ создал научную школу и воспитал квалифицированных физиков, работы которых пользуются признанием во всем мире.

On celebration of the 85th Jubilee of Prof. I.A. Golutvin



□ Голутвин И.А.

- являлся членом комиссии по аппаратуре Международного комитета по будущим ускорителям (ICFA),
- являлся членом член редколлегии "Nuclear Instruments and Methods",
- являлся членом комитета научной политики государственной программы России "Физика высоких энергий",
- являлся членом координационного комитета Роснауки по сотрудничеству с зарубежными странами в области исследования фундаментальных свойств материи,
- входит в состав руководства крупной международной коллаборации CMS в ЦЕРН,
- руководитель проекта институтов Российской Федерации и других стран-участниц ОИЯИ в CMS,
- организатор и руководитель многочисленных международных и отечественных научных конференций и симпозиумов
- действительный член Академии инженерных наук РФ, Академии естественных наук РФ, Международной Академии
- Заслуженный деятель науки РФ
- Лауреат премии РАН им А.П.Черенкова 2013

M.Itkis Opening of Scientific Seminar dedicated 85th Jubilee of Professor I.A.Golutvin, Dubna, 8 August 2019

И.А. Голутвин – крупный признанный ученый и общественный деятель.

On celebration of the 85th Jubilee of Prof. I.A. Golutvin



M.Itkis Opening of Scientific Seminar dedicated 85th Jubilee of Professor I.A.Golutvin, Dubna, 8 August 2019

Сердечно поздравляем Игоря Анатольевича с юбилеем!

Р. Карлин
Руководитель CMS

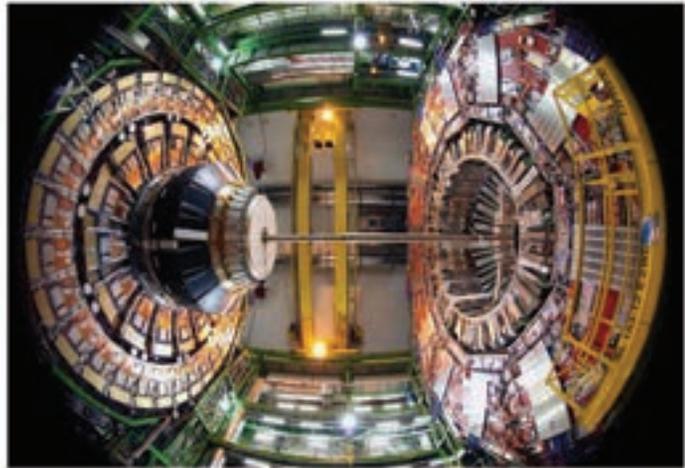


**CMS: успешное сотрудничество,
смотрящее в будущее**



CMS – успешная коллаборация, ориентированная на будущее.

CMS is a successful detector and collaboration



Thanks to the commitment and ingenuity of the collaboration, and thanks to the great detector we have built

08/09/19

R.Carlin Igor's Jubilee

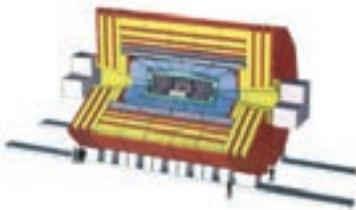
CMS – успешный детектор и успешная коллаборация, опубликовавшая более 900 статей в престижных научных изданиях.

And Igor had a big role to shape and build CMS

LABORATOIRE EUROPEEN POUR LA PHYSIQUE DES PARTICULES
CERN
EUROPEAN LABORATORY FOR PARTICLE PHYSICS

CMS

The Compact Muon Solenoid



Letter of Intent

One of the founding fathers of the CMS collaboration



JINR, Dubna, RUSSIA

T. Akichin, S. Andronov, A. Belikov, M. Bondia, Y. Chalyshin, A. Cherenkovin, N. Chernov, P. Dolinin, V. Ermonov, I. Ervikev, M. Faderov, A. Feschenko, E. Fetisova, S. Golubev, I. Golubev, I. Gancheva, L. Ivanjutsa, V. Ivanov, Y. Kalagin, Y. Khatimov, A. Khaitanov, A. Kuznetsov, Z. Kozlov, Y. Kozlov, V. Kozlovskiy, A. Lanov, S. Louna, I. Lukyanov, K. Medved, E. Merkin, V. Mityushkin, P. Mironov, A. Nigmatov, V. Panash, D. Pashchikov, I. Puzhin, E. Rastvorov, I. Savin, S. Seleznev, G. Shabatova, A. Sidorenko, G. Smirnov, N. Sazonov, A. Vasilov, E. Verbitskaya, A. Yaremchuk, G. Yarygin, I. Yudin, N. Zayats, P. Zolotarev, E. Zubov, V. Zverev

08/09/19

R.Carlin Igor's Jubilee

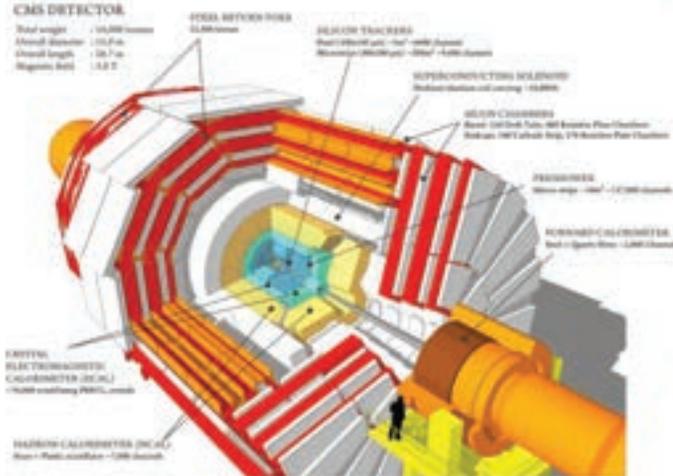
Голутвин И.А. играл большую роль в формировании и создании CMS. Он является одним из отцов-основателей коллаборации CMS.

CMS, an evolving, innovative detector



CMS DETECTOR

Total weight: 12,400 tonnes
 Overall diameter: 13.15 m
 Overall length: 15.7 m
 Maximum field: 3.8 T



- CMS, an innovative detector from the beginning
 - Large magnet with 4T magnetic field surrounding both calorimeters
 - Full Si trackers
 - Redundant muon detectors, all with trigger capabilities
 - Commodity based High Level Trigger after the L1 trigger
 - ...
- Worked extremely well, evolved in the past years and will evolve for HL-LHC keeping the characteristic innovativeness

08/09/19

R.Carlin Igor's Jubilee

CMS – развивающийся, инновационный детектор.

Focus on CMS Endcaps



JINR made major contributions to the design, construction, installation and operation of detectors in the endcaps



08/09/19

R.Carlin Igor's Jubilee

ОИЯИ внес большой вклад в проектирование, строительство, монтаж и эксплуатацию торцевых детекторов.

A flagship project: CSC and the ME1/1 muon detector

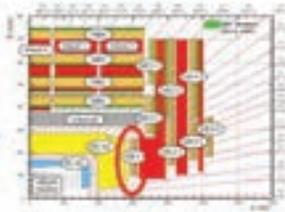


- CSC are the key muon detector in the endcaps contributing to the readout and trigger in particle density areas
- Igor had a key role in the proposal to use CSC detectors in CMS, then the chambers were produced in JINR, PNPI, Gatchina and US and have demonstrated excellent performances



08/09/19







R. Carlin Igor's Jubilee

- In particular, ME1/1 were produced in Dubna, with Igor as ME1/1 project leader

Флагманский проект: торцевой мюонный детектор (катодные стриповые камеры CSC и мюонный детектор ME1/1).

HE, another fundamental part of CMS endcaps



- Invaluable contribution of scientist and engineers from JINR in the design, construction, installation, commissioning and continuous operations of the hadron calorimeter



08/09/19

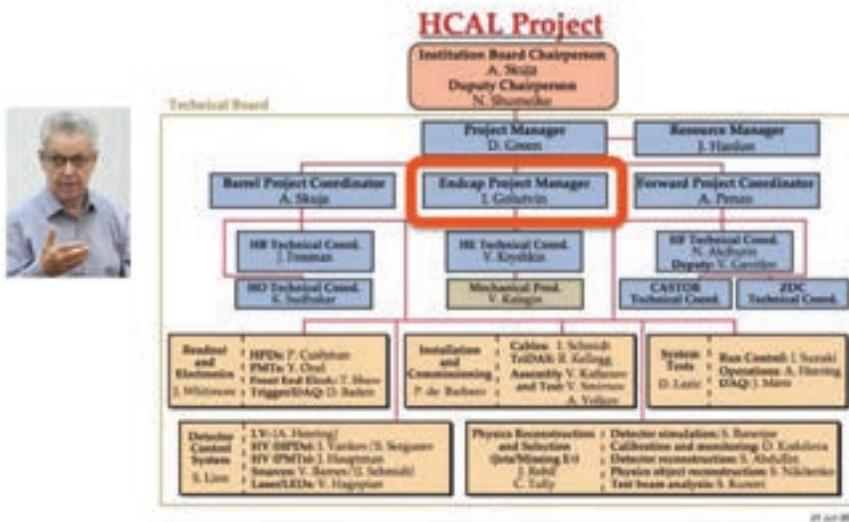




R. Carlin Igor's Jubilee

Неоценимый вклад ученых и инженеров ОИЯИ внесен в проектирование, строительство, монтаж, ввод в эксплуатацию и дальнейшую эксплуатацию адронного калориметра.

HCAL Org Chart during Installation (2005)



08/09/19

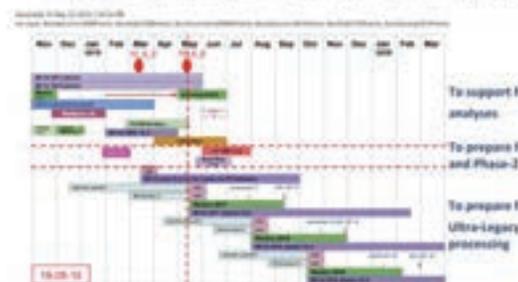
R. Carlin Igor's Jubilee

Организационная схема проекта адронного калориметра HCAL во время создания установок.

CMS, not only a detector but lot of computing and software development



- Presently Offline + Computing systems (250kCores total) cope with
 - data taking with larger-than-expected parking and Heavy Ions throughput
 - support for analyses
 - preparation of samples for Phase-II TDRs
 - evolution of our software and services
 - preparation of 50B MC events

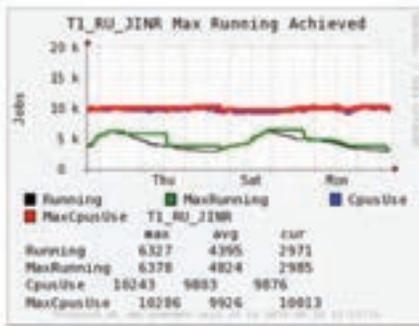


08/09/19

R. Carlin Igor's Jubilee

CMS не только детектор, но и развитие компьютеринга и программного обеспечения.

And JINR is one of our big computing centres



- Igor was instrumental in initiation GRID computing for CMS in Russia
- Now JINR T1 has an excellent availability and evolution, and a recently improved network connection
- There could be good prospect to have a more effective utilization of JINR HPC, now that CMS is migrating to heterogeneous architectures (presently mostly GPUs)

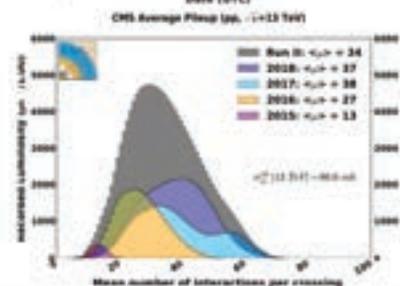
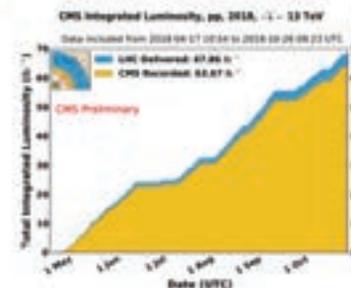
08/09/19

R.Carlin Igor's Jubilee

Игорь Анатольевич сыграл важную роль в иницировании GRID-вычислений для CMS в России. В итоге ОИЯИ имеет отличную доступность к мировой компьютерной сети.

CMS data in Run 2

- Thanks to the excellent design, CMS managed to take data with a luminosity and pile-up a factor 2 higher than planned!
 - Reminder: Run 2 data taken with an evolving detector configuration, in particular
 - upgrade of the pixel detector to 4 layers
 - upgrade of the HCAL endcap readout (long segmentation)
- What are we doing with this data? Just few examples in Higgs



08/09/19

R.Carlin Igor's Jubilee

Благодаря отличному дизайну на CMS удалось получить данные со светимостью, превышающей планируемую в 2 раза. Одним из примеров использования этих данных является открытие бозона Хиггса.

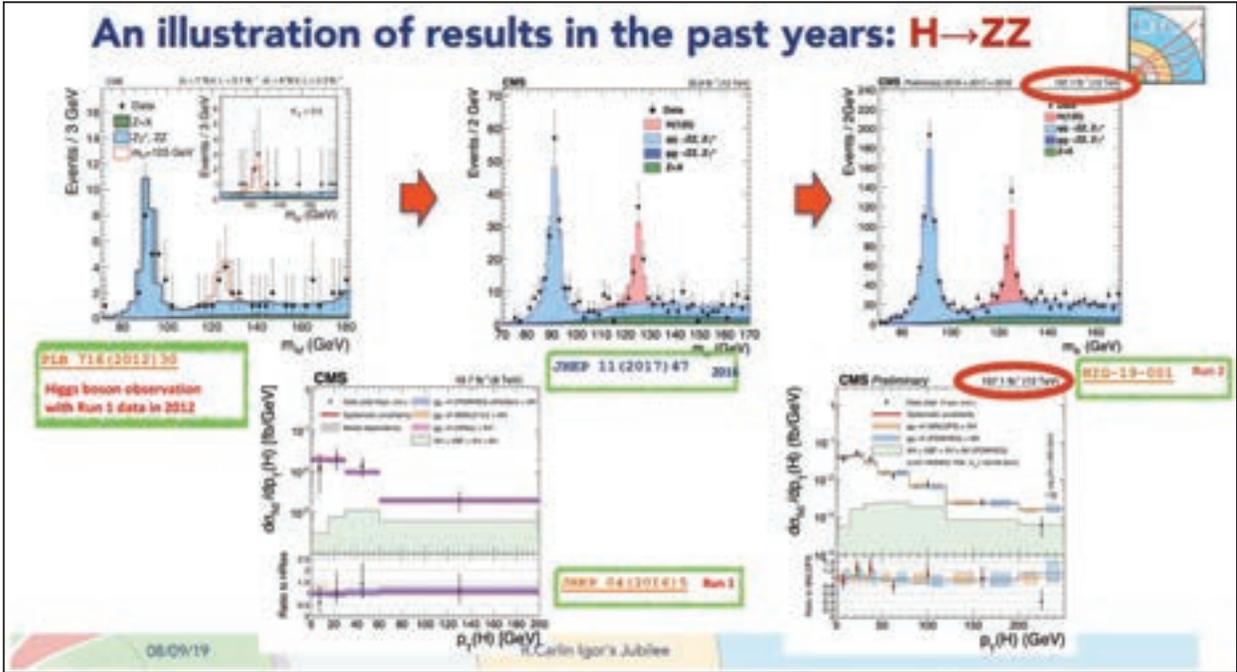
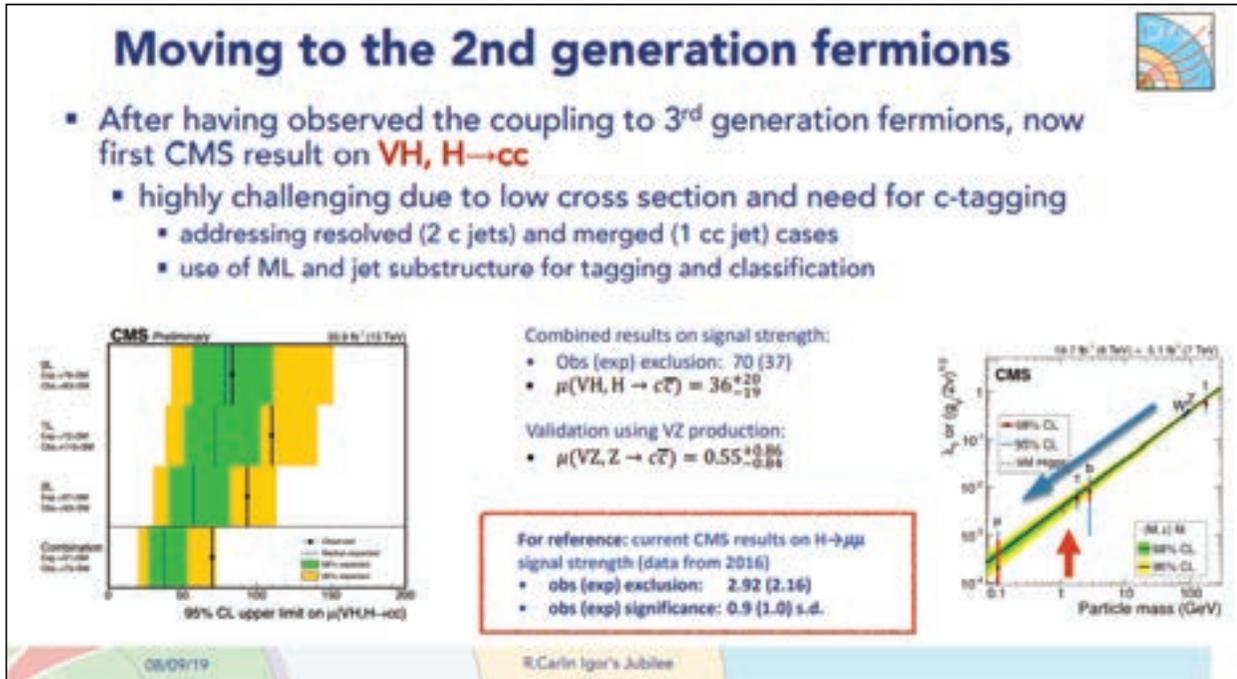
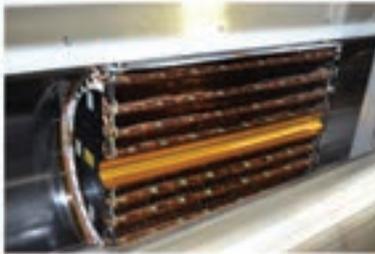


Иллюстрация результатов, полученных в последние годы.



Переход к фермионам 2-го поколения.

Now CMS is in long shutdown 2



Long shutdown 2 at CMS in full swing: Pixel detector extraction | CMS Experiment



08/09/19

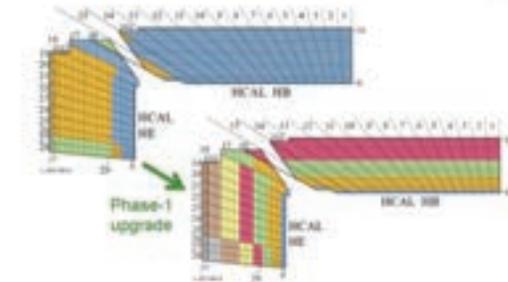
R.Carlin Igor's Jubilee

В настоящее время CMS находится в периоде остановки (Shutdown 2 на LHC), во время которой проводится модернизация установки.

Again, with strong contributions from JINR



- HB after the conclusion of HE upgrade



- "Phase 2" CSC electronics upgrade



08/09/19

R.Carlin Igor's Jubilee

При модернизации CMS снова реализуется большой вклад ОИЯИ. При участии ОИЯИ проводится модернизация калориметра и электроники катодных стриповых камер.



HL-LHC

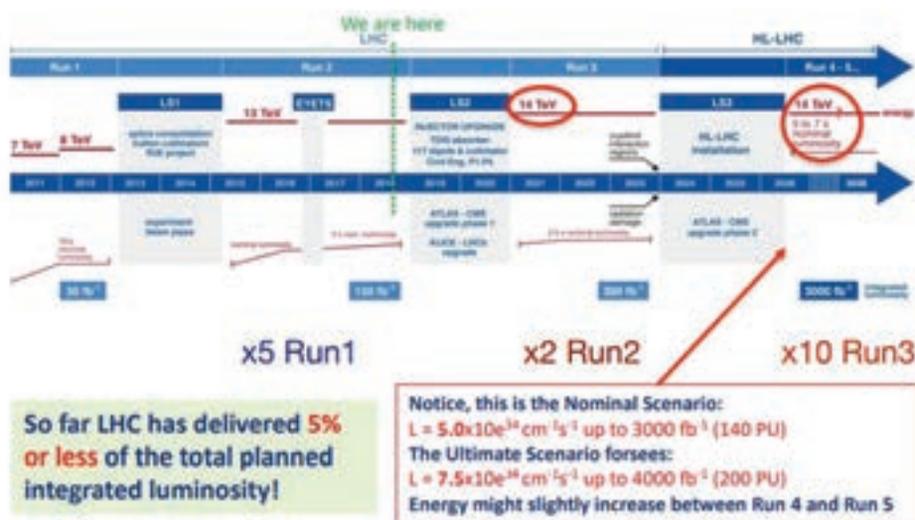
we are planning to run CMS for a long time in the future!

08/09/19

R.Carlin Igor's Jubilee

Мы планируем долгосрочную работу CMS в будущем.

The LHC Luminosity Plan



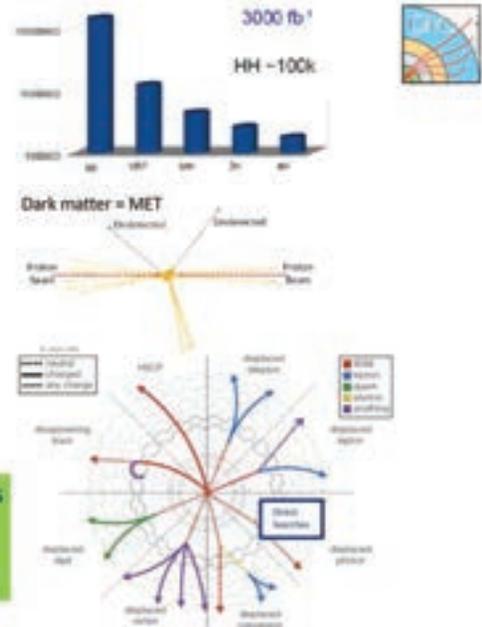
08/09/19

R.Carlin Igor's Jubilee

План повышения светимости LHC.

Reasons for HL-LHC

- HL-LHC is a Higgs factory, will produce > 150M Higgs bosons
 - A broad program:
 - Precision O(1-10%) measurements of coupling
 - Exploration of Higgs potential (HH production with ~120k of pair produced events)
 - Yukawa to 2nd generation, e.g. $H \rightarrow \mu\mu$
 - potential to reveal new particles in loops
- & New Physics – weak scales - low cross-section
 - BSM Higgs searches
 - Long Lived Particles
 - Dark Matter
 - Supersymmetry
 - Extra Dimensions



It's all about high statistics and better detectors
Need precise & flexible detector and triggers

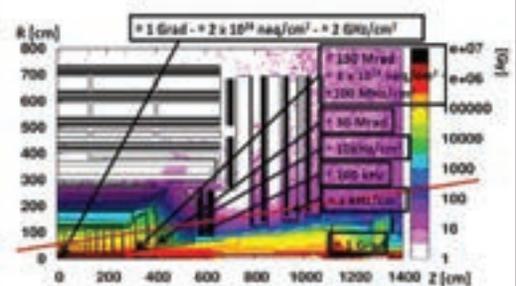
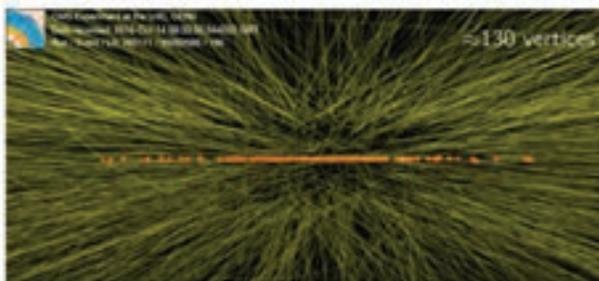
08/09/19

R.Carlin Igor's Jubilee

Причины, которые требуют работы с высокой светимостью.

HL-LHC

- What is the impact on CMS detector: two strong requirements
 - Be able to **trigger, readout and analyse** data with high instantaneous luminosity and PU up to **140 (200)**
 - Be able to cope with a much higher instantaneous and integrated radiation dose



08/09/19

R.Carlin Igor's Jubilee

Для детектора CMS при работе в условиях повышенной светимости необходимо обеспечить соответствующие триггер, считывание и анализ данных. Кроме того, следует обеспечить работу в условиях повышенных радиационных доз.

CMS HL-LHC Upgrade

Technical proposal CERN-LHCC-2015-010 <https://cds.cern.ch/record/2020886>

Scope Document CERN-LHCC-2015-019 <https://cds.cern.ch/record/2055167/files/LHCC-Q-188.pdf>

L1-Trigger/HLT/DAQ
<https://cds.cern.ch/record/2283192>
<https://cds.cern.ch/record/2283193>

- Tracks in L1-Trigger at 40 MHz
- PFlow-like selection 750 kHz output
- HLT output 7.5 kHz

Calorimeter Endcap
<https://cds.cern.ch/record/2293646>

- 3D showers and precise timing
- Si, Scint+SIPM in Pb/W-SS

Tracker <https://cds.cern.ch/record/2272264>

- Si-Strip and Pixels increased granularity
- Design for tracking in L1-Trigger
- Extended coverage to $|\eta| \approx 3.8$

Barrel Calorimeters
<https://cds.cern.ch/record/2283187>

- ECAL crystal granularity readout at 40 MHz with precise timing for e/γ at 30 GeV
- ECAL and HCAL new Back-End boards

Muon systems
<https://cds.cern.ch/record/2283189>

- DT & CSC new FF/BE readout
- RPC back-end electronics
- New GEM/RPC $1.6 < \eta < 2.4$
- Extended coverage to $|\eta| \approx 3$

Beam Radiation Instr. and Luminosity, and Common Systems and Infrastructure
<https://cds.cern.ch/record/2020836>

MIP Timing Detector
<https://cds.cern.ch/record/2296612>

Precision timing with:

- Barrel layer: Crystals + SIPMs
- Endcap layer: Low Gain Avalanche Diodes

New paradigms (design/technology) for an HEP experiment to fully exploit HL-LHC luminosity

08/09/19
R.Carlin Igor's Jubilee

Во время остановки проводится большой объем работ по модернизации детекторов установки CMS.

What are the benefits? Some example

Endcap calorimeters

- fine segmentation provides powerful discriminating variables for e-ID

CMS-LHCC-2017-002

Muon system

- L1 trigger on delayed signals with upgraded muon readout

CMS-LHCC-2017-014

MIP timing detector

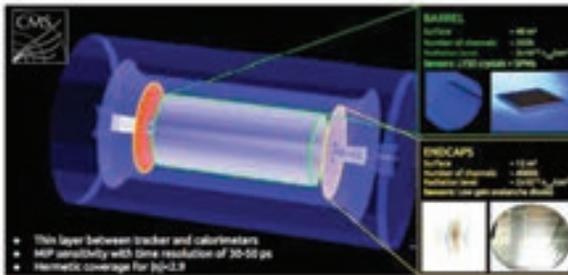
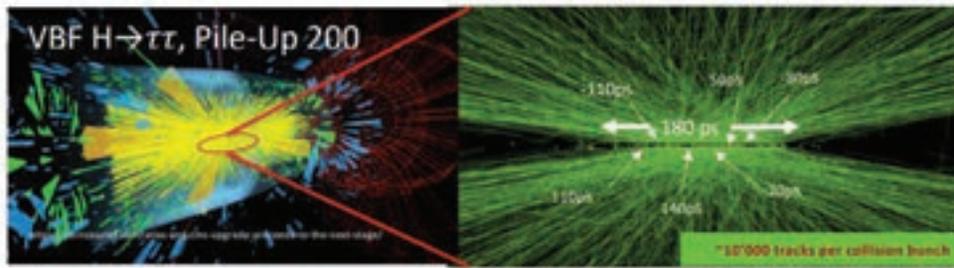
- improved efficiency of the isolation selection for leptons

CMS-LHCC-2019-003

08/09/19
R.Carlin Igor's Jubilee

Некоторые примеры модернизации детекторов.

MTD MIP Timing Detector



- 30 ps timing – the extra independent parameter makes the difference
- @ PU=200 Vertex density ~2 vertices/mm
- Unfold pile-up => sort 180ps collision area into ~30ps blocks

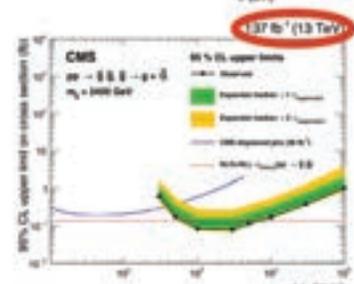
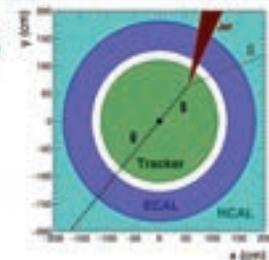
08/09/19

R.Carlin Igor's Jubilee

В результате модернизации будет улучшено временное разрешение CMS.

Delayed jets and Photons

- In HL-LHC CMS is planning to use precision timing information from all calorimeters and MTD, achieving "4 dimensional" reconstruction
- But we are already using timing now
 - Jet timing using ECAL
 - Long-lived gluinos give rise to jets from displaced vertex
 - Delay due to differences in velocity and in path length
 - uses median time of all ECAL cells in the jet cone
 - Photon timing using ECAL
 - Long-lived neutralinos decay to a photon and a gravitino
 - requires precise calibration of ECAL timing and resolution



significant extension of sensitivity w.r.t. delayed jets tracker-based searches

08/09/19

R.Carlin Igor's Jubilee

Планируется регистрация запаздывающих струй и фотонов. В CMS также планируются использовать точную временную информацию от всех калориметров, в результате чего будет достигнута «4-х мерная» реконструкция.

High Granularity Calorimeter (HGCal)



Предлагается создать адронный калориметр высокой гранулярности. Ближняя к пучку часть состоит из кремниевых детекторов (они обеспечивают необходимый уровень радиационной стойкости), внешняя часть изготавливается из более дешевых сцинтилляторов с SiPM.

High Granularity Calorimeter (HGCal)

New detector features:

- Radiation tolerance (up to 3000 fb^{-1})
- Dense calorimeter (preserving lateral compactness)
- Fine lateral granularity (two shower separation)
- Fine longitudinal granularity (energy resolution, pattern recognition, pile-up mitigation)
- Precise measurement of the time of high energy showers (pile-up rejection, identification of the vertex of triggering interaction)



EM Cal ... Less conventional structure

- Pb/SS absorbers are part of cassettes
- Cassettes stacked directly on top of each other

Hadron Cal ... Conventional structure

- Steel absorber plates with gaps
- Active detectors (cassettes) inserted into gaps

Новый калориметр высокой гранулярности позволит увеличить радиационную стойкость, улучшить разделение двух ливней и повысить точность временных измерений.

А.В. Зарубин

Начальник научно-экспериментального
отдела физики на CMS, ОИЯИ



Методы эксперимента: взгляд в будущее



Зарубин А.В. от всей души поздравляет Игоря Анатольевича с юбилеем.



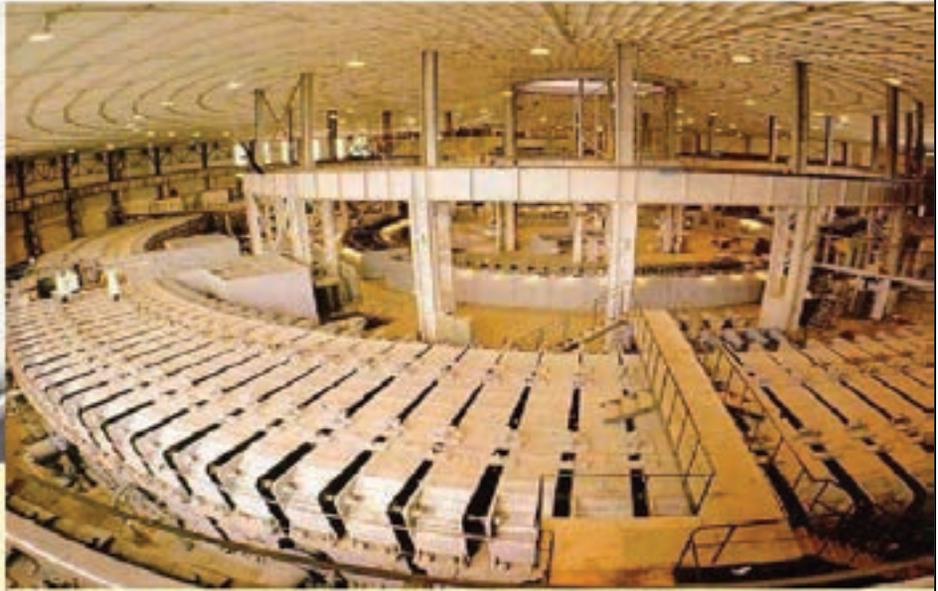
Experiments at Synchrophasotron



V.Veksler

Director of LHE

Designer of
Synchrophasotron



SPT parameters:	energy	10 GeV
	intensity	$4 \cdot 10^{12}$ ppp

A.Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

И.А. Голутвин – активный организатор экспериментов на синхрофазотроне.



Enthusiasts of Tracking Detectors



Well known wire chamber inventors:

G.Charpak - MWPC and A.Walenta - DC

But the way for gaseous tracking detection was opened due to development of the **filmless readout**

at CERN - **F.Krienen**

at JINR - **I.Golutvin** –

pioneer and enthusiast of the tracking detectors development and its on-line applications at JINR and abroad



CERN, October 1964



A.Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

Голутвин И.А. – пионер и энтузиаст в создании трековых детекторов.

The first in USSR HEP on-line experiment

1967 π p scattering at small transfer momenta at Dubna Synchrophasotron

Goal:

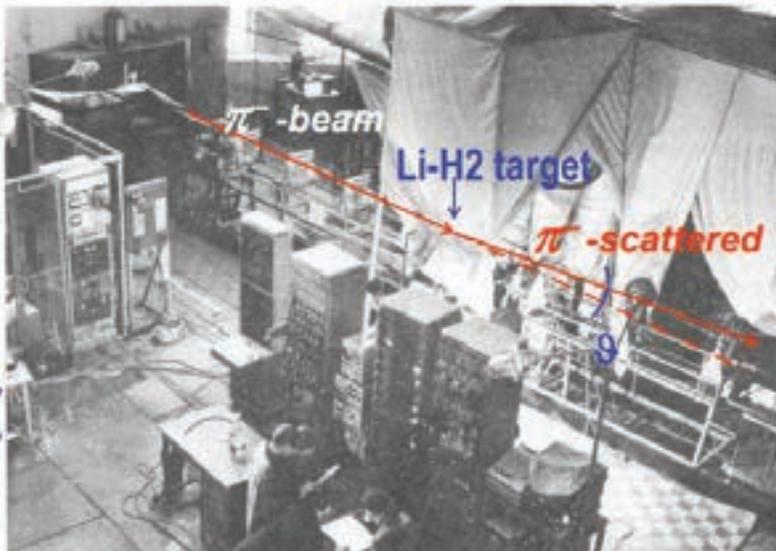
verification of forward dispersion relations

$$10^{-4} \leq -t \leq 10^{-2} \text{ (GeV/c)}^2$$

$$P_{\pi} = 1 - 7 \text{ GeV/c}$$

$$2 \text{ mrad} \leq \theta \leq \pm 22 \text{ mrad}$$

- angular resolution < 1 mrad,
- momentum resolution ~ 1%,
- high statistics ($\Delta\sigma \sim 1\%$),
- small systematics



A.Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

Игорь Анатольевич – инициатор первых он-лайн экспериментов на синхрофазотроне.

Experiments at U-70 in Protvino



U-70 parameters: energy 76 GeV
intensity $1.7 \cdot 10^{13}$ ppp

A. Logunov
Director of IHEP

A.Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

Эксперименты на У-70 в Протвино.

Experiment on $K^0_L - K^0_S$ regeneration

A.Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

Эксперимент по $K^0_L - K^0_S$ регенерации.

Experiment on $K^0_L - K^0_S$ regeneration

The main part of the apparatus — 18 double coordinate magnetostrictive spark chambers provided the best in the world invariant mass resolution

A.Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

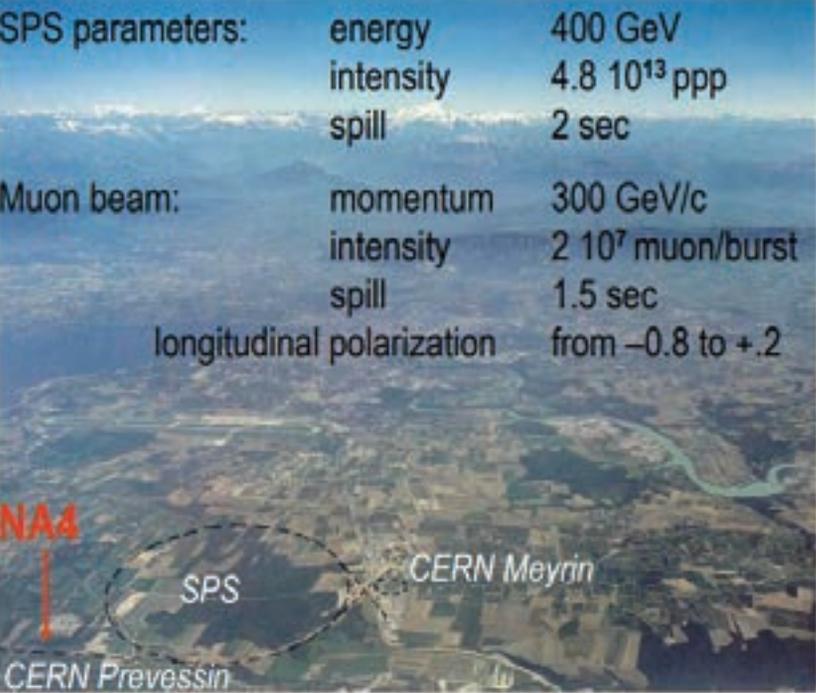
Основная часть установки – 18 двухкоординатных магнитострикционных искровых камер, обеспечивающих лучшее в мире разрешение по инвариантной массе.

Co-operation with CERN at SPS

SPS parameters:	energy	400 GeV
	intensity	$4.8 \cdot 10^{13}$ ppp
	spill	2 sec
Muon beam:	momentum	300 GeV/c
	intensity	$2 \cdot 10^7$ muon/burst
	spill	1.5 sec
	longitudinal polarization	from -0.8 to $+0.2$



John Adams
 Director – General of CERN
 Director of the SPS project – Super Proton Synchrotron



NA4
 SPS
 CERN Meyrin
 CERN Preveessin

A.Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

И.А. Голутвин явился одним из инициаторов сотрудничества с ЦЕРН.

Co-operation with CERN at SPS

High Luminosity spectrometer for deep inelastic muon scattering



BCDMS
 NA4 Collaboration
 Bologna
 CERN
 Dubna
 Munich
 Saclay

07 May 1975 – 16 August 1985

A.Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

Спектрометр NA4 с высокой светимостью для исследования глубоко неупругого рассеяния мюонов с пропорциональными камерами, созданными под руководством И.А. Голутвина.

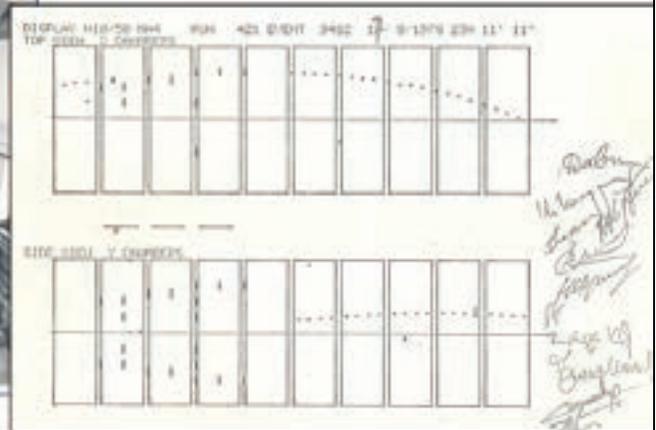


Installations



Chambers were tested before and after transportation, installed in the magnet and putted in operation in 1978

The very first muon track recorded by the spectrometer in the Dubna chambers with signatures of participants

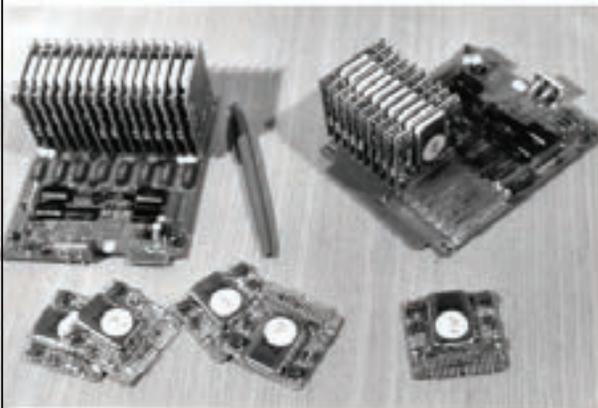


A.Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

Самый первый мюонный трек, зарегистрированный дубненскими камерами с подписями участников.



Industrial MWPC electronics RPK-32



RPK-32 MWPC readout electronics were widely used in many HEP experiments

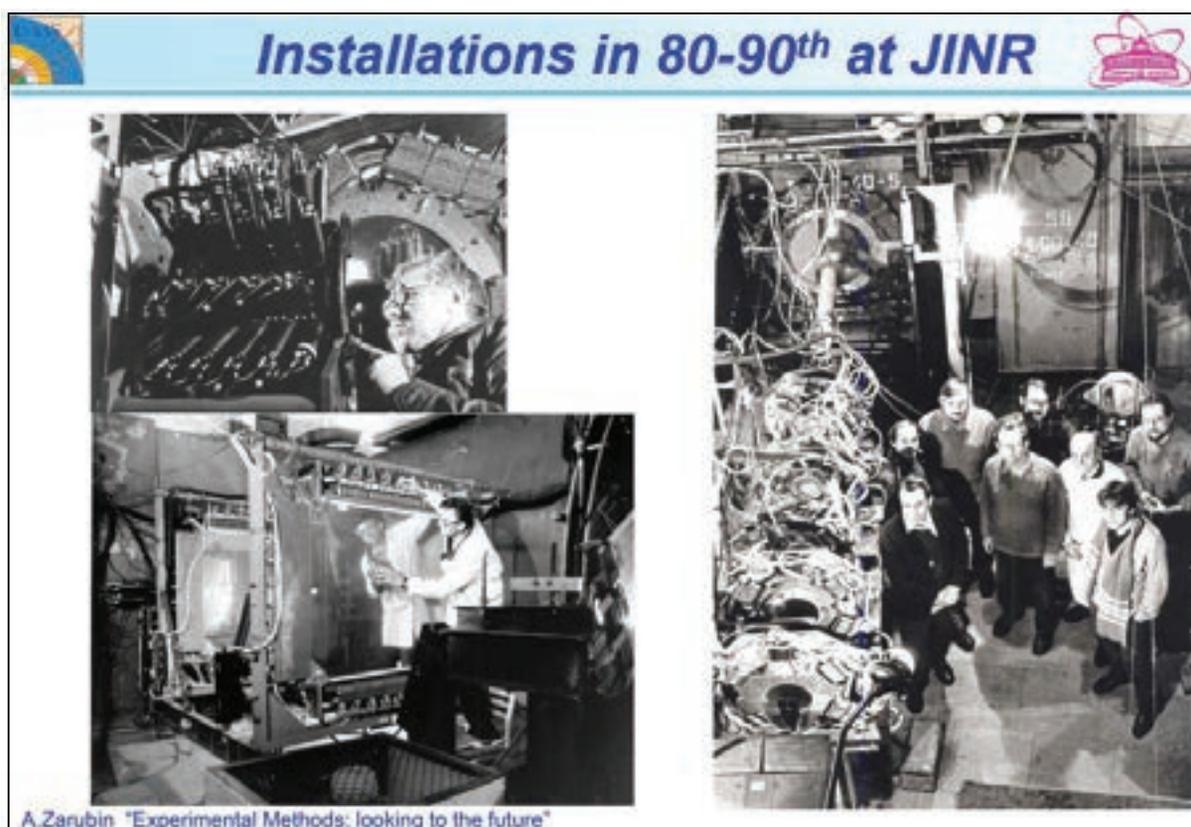
A.Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

13

Считывающая электроника многопроводных пропорциональных камер RPK-32 широко использовалась во многих экспериментах физики высоких энергий.



Установки в ИФВЭ в 80-90-х годах с дубненскими камерами: нейтринный детектор и установка SIGMA.



Установки в ОИЯИ в 80 – 90-х годах с камерами, разработанными под руководством И.А. Голутвина.

Installations in 90th at CERN and DESY



A.Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

Установки в ЦЕРН и ДЕЗИ в 90-х годах: эксперимент SMC (ЦЕРН) и эксперимент HERA-B (ДЕЗИ).



Co-operation with CERN at LHC

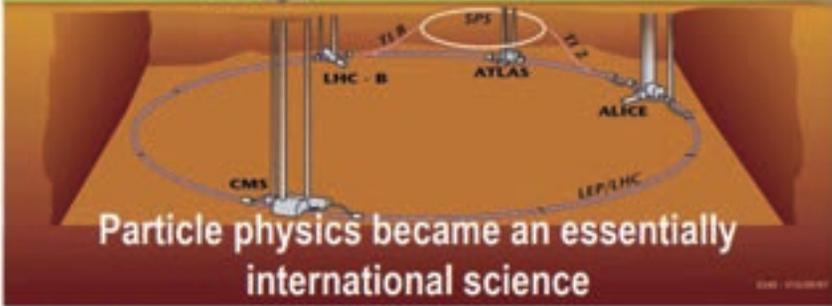


Overall view of the LHC experiments.

LHC parameters:	energy	2 x 7 TeV
	luminosity	10^{34}
	bunch-crossing	25 ns

Commissioning in 2009

20% of the machine and experiments cost must be covered by CERN non-Member States



Particle physics became an essentially international science



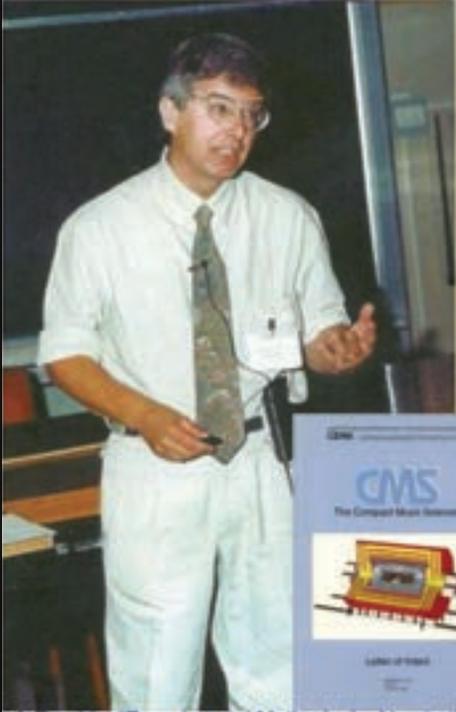
Carlo Rubbia

Director – General of CERN
Initiator of the LHC project – Large Hadron Collider

A.Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

Карло Руббиа – директор ЦЕРН в период 1989 – 1993 гг. Инициатор проекта Большого адронного коллайдера (LHC).

CMS Foundation, March 1992, Evian



- ❑ 5 - 8 March 1992: 650 physicists meet in Evian to discuss experiments on CERN's new accelerator project, the Large Hadron Collider (LHC)
- ❑ Michel Della Negra presented a concept of LHC Experiment based on super conducting solenoid with a strong magnetic field "Compact Muon Solenoid - CMS"
- ❑ I. Golutvin was one of the founder of the CMS experiment. **CMS Expression of Interest was signed by 49 Institutions from 21 countries**

In a short time - 6 month later:

- ❑ Letter of Intent on 1 October 1992 was signed by 62 Institutions from 25 countries
 - powerful tracker based on Silicon and MSGC
 - precise crystal electromagnetic calorimeter
 - two options of hermetic hadron calorimeter
 - cooper + scintillator
 - cooper + silicon
 - precise muon system
 - magnetic field 3.8 T in a large volume

A.Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

Голутвин И.А. – один из основателей эксперимента CMS.

Letter of Intent, 1 October 1992. Physics Goal

- ❑ **Abstract of the CMS Letter of Intent, submitted to the LHC Experiments Committee (LHCC) on 1 October 1992**
- ❑ *"We propose to build a general purpose detector designed to run at the highest luminosity at the LHC. The CMS (Compact Muon Solenoid) detector has been optimized for the search of the **SM Higgs boson** over a mass range from 90 GeV to 1 TeV, but it also allows detection of a wide range of possible **signatures from alternative electro-weak symmetry breaking mechanisms.**"*

**CMS was designed as an experiment for discovery!
And required an excellent Collaboration**

A.Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

1 октября 1992 года на LHC комитете по экспериментам (LHCC) было сделано предложение о создании CMS для поиска бозона Хиггса. CMS был создан как эксперимент для открытий.

RDMS CMS Foundation, 1994, by I.Golutvin



Dubna 27 September 1994

- ❑ JINR member-states participate in CMS Project in frame of Russia and Dubna Member States – RDMS CMS Collaboration
- ❑ Formally RDMS was established in Dubna on 27 September 1994
- ❑ In fact RDMS physicists have participated in CMS since 1992 before formal decision were made
- ❑ In RDMS there are about 300 scientists and 32 Students, from 7 States and 23 Institutions

- ❑ **Main principles of the RDMS Collaboration:**
 - participation of Institutions in the CMS experiment as independent scientific groups;
 - unification of technical and financial contributions and obligations of different Institutions as the joint Collaboration deliverables to experiment
- ❑ **Main aims of the Collaboration strategy:**
 - unification of the efforts of many groups from different institutions and countries;
 - concentration of efforts at several well defined CMS sub-systems (for example Endcap)
 - and broad involvement of Industry of participating States

27 сентября 1994 года в Дубне была основана коллаборация RDMS (Russia and Dubna Member States).

In RDMS Collaboration are about 300 scientists

Russia

Russian Federation

- Institute for High Energy Physics, Protvino
- Institute for Theoretical and Experimental Physics, Moscow
- Institute for Nuclear Research, RAS, Moscow
- Moscow State University, Institute for Nuclear Physics, Moscow
- Petersburg Nuclear Physics Institute, RAS, St.Petersburg
- P.N.Lebedev Physical Institute, Moscow

Associated members:

- High Temperature Technology Center of Research & Development Institute of Power Engineering, Moscow
- Myasishchev Design Bureau, Zhukovsky
- Electron, National Research Institute, St. Petersburg

JINR
• Joint institute for Nuclear Research, Dubna

Dubna Member States

Armenia

- Yerevan Physics Institute, Yerevan

Belarus

- Byelorussian State University, Minsk
- Research Institute for Nuclear Problems, Minsk
- National Centre for Particle and High Energy Physics, Minsk
- Research Institute for Applied Physical Problems, Minsk

Bulgaria

- Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, BAS, Sofia
- University of Sofia, Sofia

Georgia

- High Energy Physics Institute, Tbilisi State University, Tbilisi
- Institute of Physics, Academy of Science, Tbilisi

Ukraine

- Institute of Scintillation Materials of National Academy of Science, Kharkov
- National Scientific Center, Kharkov Institute of Physics and Technology, Kharkov
- Kharkov State University, Kharkov

Uzbekistan

- Institute for Nuclear Physics, UAS, Tashkent

JINR, Dubna - 68

Since last years also 5 universities joined:

- MEPhI, Moscow
- MPTI, Dolgoprudny
- NSU, Novosibirsk
- TPU and TSU, Tomsk

Russian Federation - 133

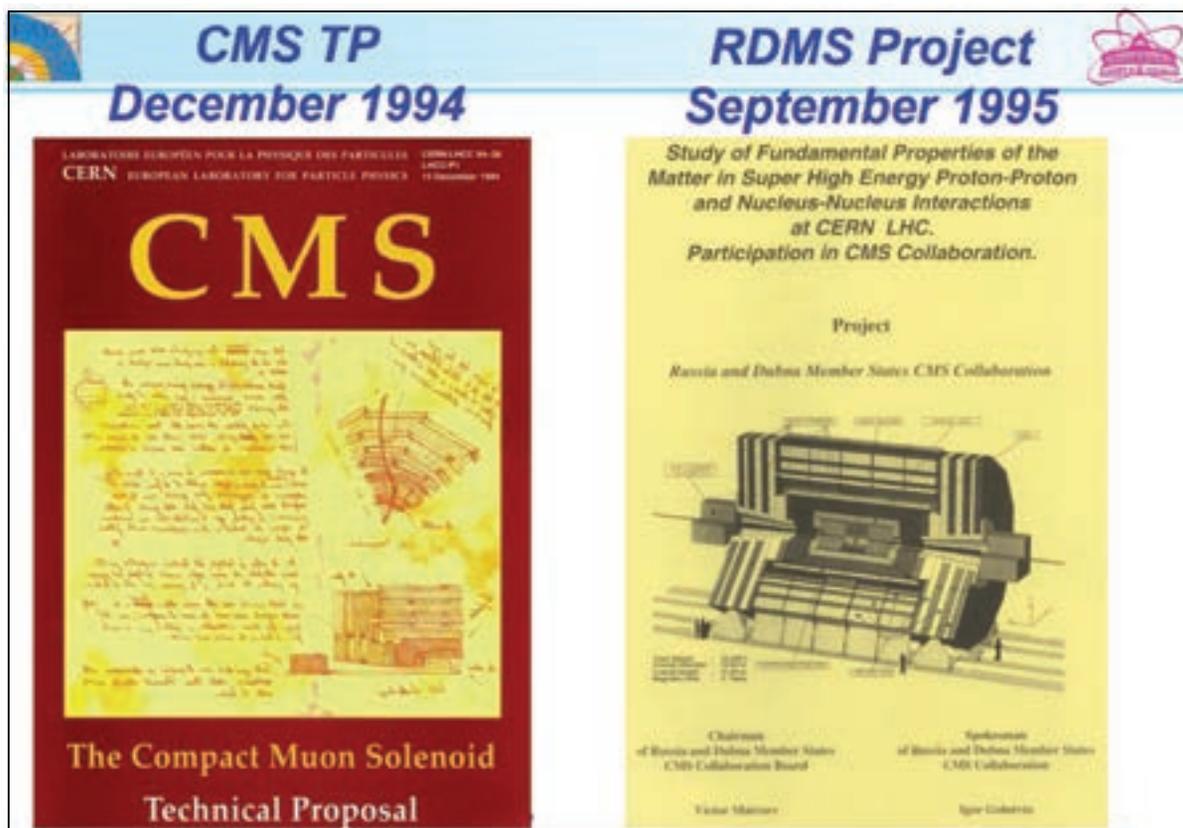
Country/Institution	Count
Russian Federation	133
JINR, Dubna	68
Ukraine	10
Uzbekistan	11
Georgia	11
Bulgaria	21
Belarus	21
Armenia	5
Belgium (LPI)	8
France (PPPI)	36
USA (NSU)	27
USA (IHEP)	18
USA (JINR)	18
USA (SHEP)	48

Dubna Member States - 80

CMS members:	
countries	7
institutions	20
scientists	303
students	32
Associated members:	
institutions	3

A.Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

Коллаборация RDMS включает в себя около 300 ученых.



Первые документы коллаборации CMS (Технический проект и проект RDMS).

Wide application of CSC in HEP

I. Golutvin invented, proposed and developed a wide application of new detectors in order to construct a frontier CMS

ME1/2
ME1/1
CERN, 1994

Cathode Strip Chambers, CSC

Cathode Strip Chambers were proposed for CMS Endcap Muon System. The first prototype in 1993 demonstrate precision of 53 mkm

**I. Golutvin et al
Dubna 0.5x0.5 m² RD5 CSC prototype, 1993:
Milestones Report, CMS Collaboration,
CERN/LHCC 93-48, p.70, 1993**

The innermost ME1/1 stations of Endcap muon system located in 4Tesla solenoid developed by JINR in cooperation with Minsk, with I.Golutvin as Project Leader. Other endcap station were build by US institutes in cooperation with Gatchina

310 CSCs, 340,000 channels in CMS

Для торцевой мюонной системы CMS были предложены катодные стриповые камеры. Первый прототип в 1993 году продемонстрировал точность в 53 мкм.

1979 First Cathode Strip Chamber



1979:

- The very first Cathode Strip Chamber was designed at JINR for NA4 R&D in 1979 to improve vertex:

Chamber size	- 3x1.5 m
Strip length	- 1.5 m
Strip width	- 20 mm
Gap	- 7 mm
Wires	- 20 mkm

Cathode resolution ~ 2 mm

- Next studies of set of small prototypes demonstrate cathode resolution of 50 mkm



A.Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

Самые первые катодные стриповые камеры были созданы в ОИЯИ в рамках R&D для проекта NA4 в 1979 г.

Cathode Strip Chambers Mass-production



JINR (Dubna), Belarusian and Bulgarian institutions bear full responsibility for design and construction of the First Forward ME1/1 Muon station based on technology of cathode strip chambers. 76 chambers with precise spatial and excellent timing resolution manufactured in Dubna and delivered to CERN

A.Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

76 камер с высоким пространственным разрешением и отличным временным разрешением были изготовлены в Дубне и доставлены в ЦЕРН.



Передняя мюонная станция установки CMS с катодными стриповыми камерами.

Muon system Upgrade CMS@LHC

RDMS Scientists participate in Phase1 CMS Upgrade

In 2015 the Upgrade of the Innermost ME1/1 and outer ME4/2 stations of Endcap muon system was successfully completed.

During several years all 72 chambers were removed from CMS Detector, equipped with new fast electronics developed in cooperation with Minsk and US groups, and reinstalled to CMS.

72 new chambers were build by Gatchina experts for Muon Station ME4/2 and equipped with "old" electronics from ME1/1

As a result Muon system performance is improved:

- > acceptance of Muon System increased up pseudorapidity 2.4
- > spatial resolution reach 50-60 mkm per station
- > high rate capability is achieved

Upgraded ME Stations demonstrate high operation and trigger efficiency and muon identification in Run 2 at 13 TeV

Reinstallation of ME1/1 CSCs in cavern

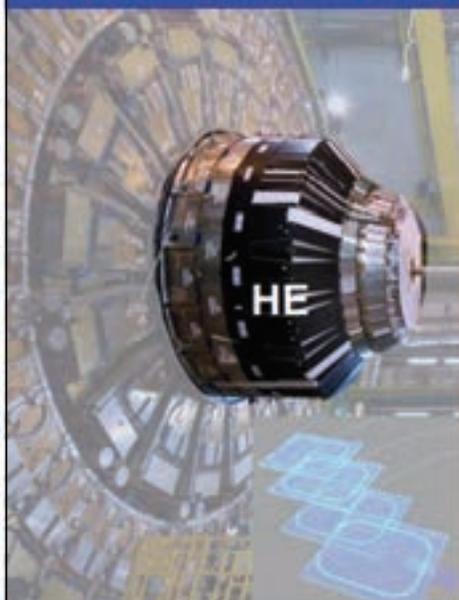
Refurbishing of ME1/1 CSCs in surface lab

Обновленные мюонные станции показали высокую эффективность триггера и обеспечили хорошую идентификацию мюонов во втором сеансе LHC (13 ТэВ).

Wide application of Sigma Tiles in HEP



RDMS Scientists invented and developed a wide application of new detectors in order to construct a frontier CMS



Hadron Calorimetry

Based on plastic scintillators with embedded WLS fibers, so called sigma tiles, proposed for Hadron calorimetry in 1986 in IHEP, Protvino

V. I. Kryshkin and A. I. Ronzhin,
Nucl. Instr. Meth. A 247 (1986) 583

Endcap calorimeters developed by RDMS under leadership of I. Golutvin as Project Manager in cooperation with Rosatom enterprises and MZOR, Minsk

600 tons of brass absorber were made of military shells

8,000 channels in CMS

Ученые RDMS коллаборации разработали и создали новые детекторы для эксперимента CMS.

HE , Hadronic Endcap, 300 tons



HE+1
Assembled in
September '03



HE-1
Assembled in
November '02

A. Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

Вид адронного торцевого калориметра весом 300 тонн.

Wide application of SiPM. Calorimetry Upgrade

RDMS Scientists participate in Phase1 CMS Upgrade

In April 2018 the Upgrade of Front-End Endcap calorimeters HE with SiPMs was successfully completed by RDMS team of qualified experts.

Intense but smooth operation, confirming excellent experience with HEP17 pilot SiPM system in 2017

- > HPDs replaced with SiPMs – 7.500 channels
 - Eliminated dominant source of HE signal loss (HPD photocathode deterioration)
 - x2.5 increase in photo-detection efficiency (SiPM vs HPD)
 - Eliminated sources of coherent noise (HPD discharges and HPD HV system)
- > Increased longitudinal segmentation (2-3 → 6-7 readout depths)
- > Added TDC information

Upgraded and pre-calibrated Endcap calorimeters HE demonstrate high operation efficiency and jet identification in 2018 Run 2 at 13 TeV



Upgrade of HE Endcap Calorimeters in cavern

Кремниевые фотоумножители нашли широкое применение для развития калориметрии. Обновленный и прокалиброванный адронный калориметр показал высокую эффективность во втором сеансе LHC при энергии 13 ТэВ.

Wide Application of PWO crystal in HEP




RDMS Scientists invented and developed a wide application of new detectors in order to construct a frontier CMS

PWO crystal was born in "SingleCrystal", Kharkov

PWO₄ crystals were proposed for EM-calorimetry in 1992 by IHEP, Protvino

V. A. Kachanov.
"Study of characteristics of real-size PbWO₄ crystal cells for precise EM-calorimeters to be used at LHC energies" Workshop, Chamonix, 1992

This R&D led to wide application of PWO in HEP

Precise Electromagnetic Calorimeters, EB for barrel and EE for endcaps were developed by RDMS and other CMS institutes in cooperation with Bogoroditsk plant

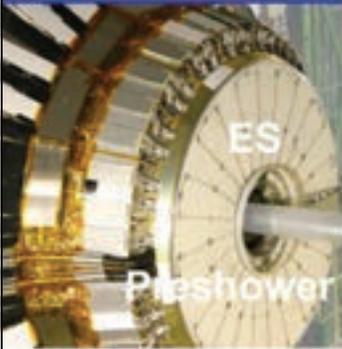
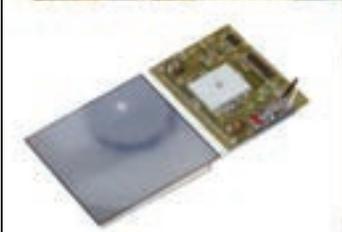
76,000 crystal channels in CMS

Also PWO crystals widely used in ALICE at LHC and many other HEP experiments

Кристаллы PWO (вольфрамат свинца) широко используются не только в эксперименте CMS, но и в других крупных установках физики высоких энергий.

Wide application of Si detectors in HEP

I. Golutvin proposed, invented and developed a wide application of new detectors in order to construct a frontier CMS

Based on Dubna Silicon Program in cooperation with Italian scientists a new technology for pad (pixel), thin and coarse strip Si-detectors was developed in 90-th.

Also Silicon Option for the Endcap HCAL invented for CMS Lol in 1992.
 I.A. Golutvin et al.
 RD35: "Silicon Hadron Calorimeter module for LHC",
 CERN/DRDC/91-54, DRDC/P34, January 13th 1992

This R&D led to wide application of Si tracking in HEP

CMS Preshower developed by JINR in cooperation with Zelenograd, ELMA and other CMS groups 18 m², 144,000 channels in CMS

All Si Tracker developed by CMS

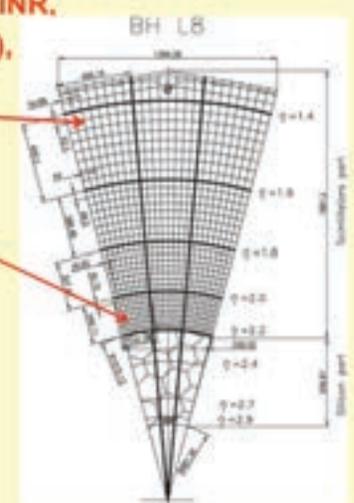
Today, 25 years later, the idea of Si tracking HCAL accepted by CMS at the modern level as High Granularity Calorimeter for HL-LHC

В 90-х годах дубненскими учеными совместно с итальянскими коллегами были предложены новые технологии для пэдовых и стриповых кремниевых детекторов.

On Phase 2 Upgrade of Endcap Hadron Calorimeter BH (HGAL)

Study of possibility of RDMS networking for scintillator module production site in Dubna with participation of: JINR, LPI (Moscow), ISMA (Kharkov), MEPH (Moscow), INR (Moscow), INP (Tashkent), as well as DESY and CERN

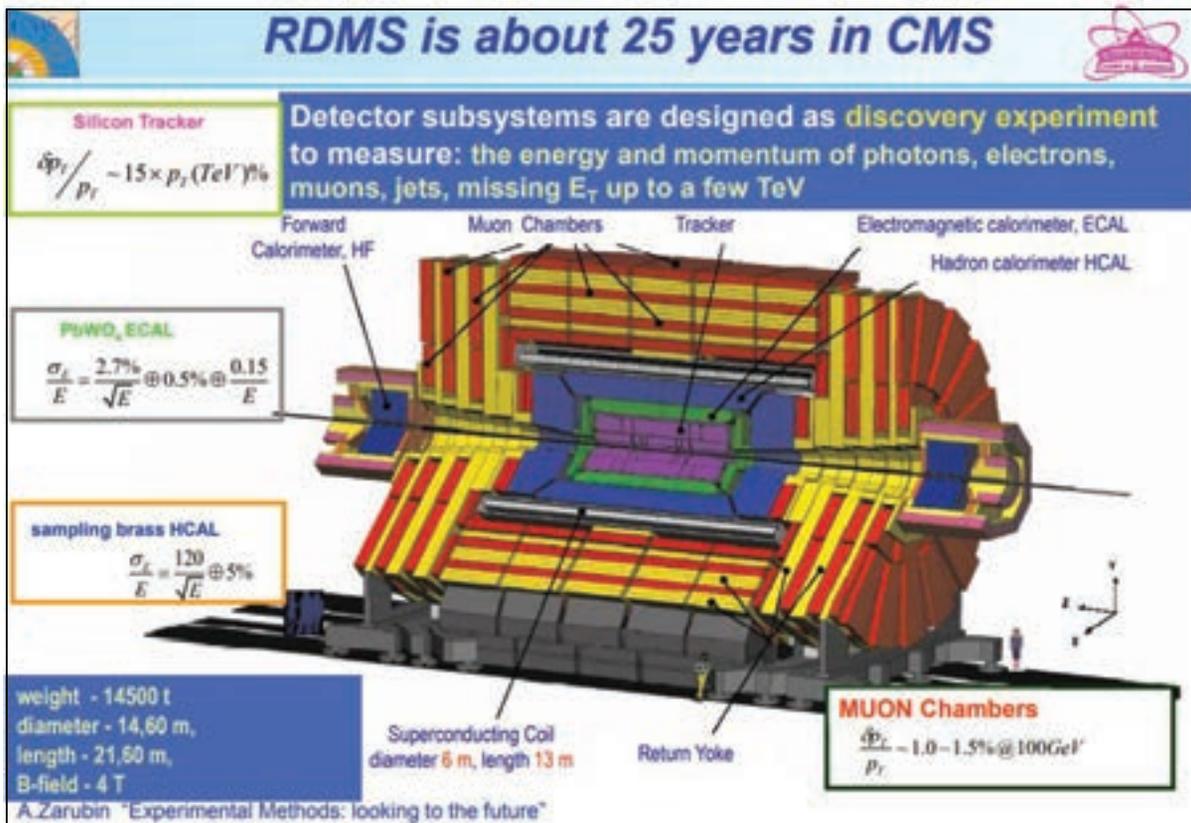
- ❑ "Macrotile" concept for scintillation part of HGAL was proposed, developed, prototyped in Dubna, based on the commercially produced scintillator (EJ 260 or similar).
- ❑ Wide R&D with selected types of detectors (scintillators and SiPM) is well going on.
- ❑ Choice and selection by CMS of scintillator technology is planned in the mid of October 2019



12 Scintillator modules in 30 degrees cassette
64 tiles are in the module

A.Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

Дубненскими учеными была предложена новая концепция сцинтилляционной части торцевого адронного калориметра CMS.



Коллаборация RDMS успешно работает в рамках эксперимента CMS уже около 25 лет.

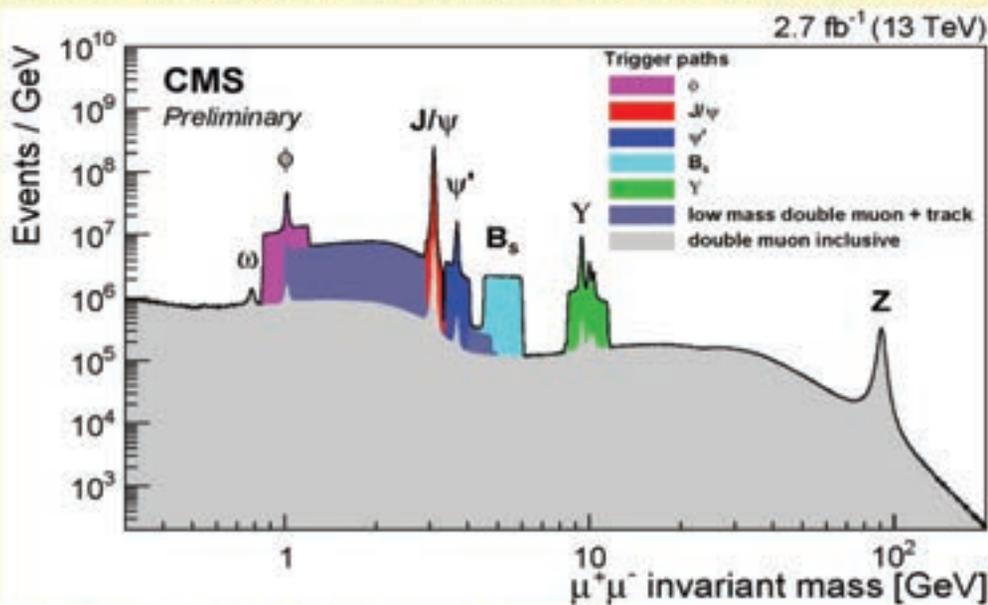
RDMS Achievement in CMS@LHC. Physics

- ❑ RDMS scientists developed an adequate computing based on GRID technology, including CMS Tier-1 in JINR with regional Tier-2's at RDMS institutions associated with physics tasks
- ❑ CMS Remote Operational Centres for data monitoring and certification developed in Dubna and all RDMS institutes help for data taking and certification
- ❑ Data processing and physic analysis performed by RDMS scientists demonstrate manifestation of the Standard Model at 7 and 13 TeV
- ❑ No evidence for New Physics beyond SM
- ❑ Regular Joint sessions of RDMS Collaboration Board and Executive Committee, All RDMS remote seminar "Physics at LHC", Annual RDMS Conferences are helpful to joint efforts

Коллаборация RDMS имеет значительные достижения в эксперименте CMS на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН.

SM verification. Physics Objects@13 TeV

CMS shows an excellent performance to detect different signals

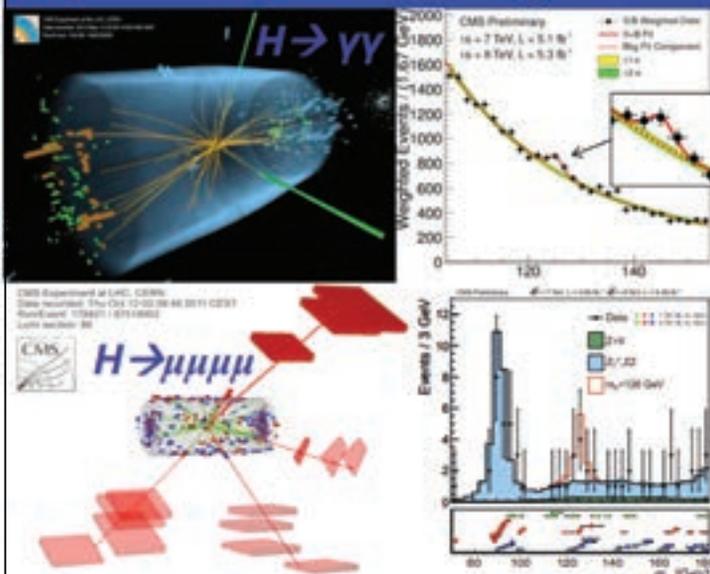


A.Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

Эксперимент CMS демонстрирует отличные параметры, позволяющие регистрировать различные сигналы.

Breakthrough in Experiments @ LHC

The most important event in Particle Physics in XXI century – is the discovery of the Higgs Boson at CMS and ATLAS at LHC, announced by two Collaborations on 4 July 2012 at scientific seminar at CERN



The key and decisively contribution in the discovery of Higgs Boson of RDMS scientists from JINR Member States is honoured with commendation by CMS Spokesperson Joe Incandela in his letter addressed to RDMS authors of discovery on 31 July 2012

Самое важное событие в физике элементарных частиц в XXI веке – это открытие бозона Хиггса на установках CMS и ATLAS на LHC, о котором официально было объявлено коллаборациями 4 июля 2012 года.

Breakthrough in Experiments @ LHC

**European Physical Society
PRIZE**

The 2013 High Energy and Particle Physics Prize
An awarding contribution to High Energy Physics

is awarded to the
ATLAS and CMS collaborations
for the discovery of a Higgs boson, as predicted by the Brout-Englert-Higgs mechanism

and to
Michel Della Negra, Peter Jenni, and Tejinder Virdee
for their pioneering and outstanding leadership roles in the building of the ATLAS and CMS experiments

Paris, France, July 2013

Contribution of the RDMS scientists in the discovery of a Higgs Boson, as predicted by the Brout-Englert-Higgs mechanism, is awarded by European Physical Society Prize on the strength of the CMS and ATLAS Collaborations on July 2013.

For outstanding contribution in CMS and ATLAS experiments resulting in discovery of Higgs Boson the leader of Russian team in ATLAS A.M.Zaitsev (IHEP) and the RDMS CMS Spokesperson I.A.Golutvin (JINR) are awarded by P.A.Cherenkov Prize of RAS in 2014

В 2014 году за выдающийся вклад в эксперименты CMS и ATLAS, в результате которого был открыт бозон Хиггса, руководитель RDMS CMS И.А.Голутвин (ОИЯИ) и руководитель российской группы ATLAS А.М.Зайцев (ИФВЭ) награждены премией имени П.А.Черенкова РАН.

Conclusion: Scale of the progress

CMS
A Compact Solenoidal Detector for LHC

BCDMS

BIS

XP

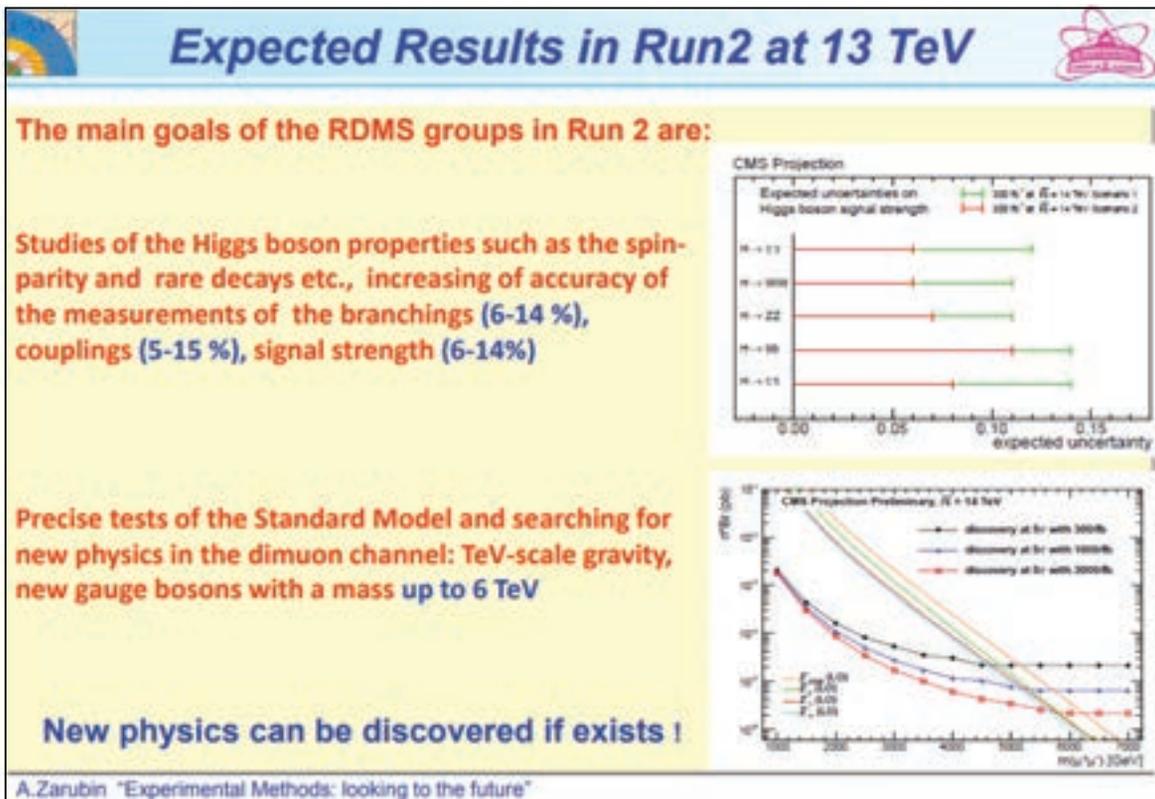
CMS PAMA-001-11/01/97

A.Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

Масштабы прогресса.



Наша жизнь в эпоху ЛHC.



Основные цели коллаборации RDMS: изучение свойств бозона Хиггса, проверка Стандартной модели с высокой точностью и поиск новой физики.

Main Objectives for Future

- ❑ RDMS under leadership of I.Golutvin made it possible to build the CMS experiment with a wide participation of JINR Member States, and
- ❑ gave Equal Opportunities for each group and new generation of physicists to participate in frontier Physics

Next steps:

- ❑ Study of the Brout-Engelert-Higgs mechanism is still a main focus
- ❑ Search for Supper Symmetry signals
- ❑ ...

↓

CMS Phase 2 Upgrade at HL-LHC

I would wish to I.Golutvin be always a leader looking for the future, and great scientific success !

A.Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

RDMS коллаборация под руководством И.А.Голутвина позволила реализовать CMS эксперимент с широким участием стран-участниц ОИЯИ и дала равные возможности участия каждой группе физиков.

Я желаю И.Голутвину постоянно быть лидером , смотрящим в будущее, и больших научных успехов.

On celebration of the 85th Jubilee of Prof. I.A. Golutvin

85

**Поздравляем!
Congratulations!**

A.Zarubin "Experimental Methods: looking to the future"

Еще раз поздравляем Игоря Анатольевича с 85-летием!

М. Гузевич

Ведущий научный сотрудник Университета Лиона

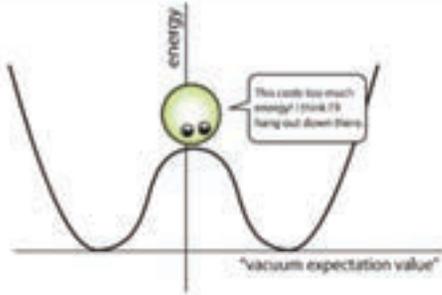


Бозон Хиггса: открытие, изучение и будущее

 Maxime Gouzevitch 

Higgs boson : discovery, study and future

1) Introduction: historical perspective
2) Situation before the LHC
3) Higgs Hunting at the LHC
4) Future colliders



Jubilee Seminar dedicated to the 85th anniversary of Prof. I. Golutvin

08/08/2019

Максим Гузевич «Бозон Хиггса: открытие, изучение и будущее».

Introduction: Historical Perspective

Spontaneous (dynamical) symmetry breaking

L. Euler, *Memoires de l'Academie des Sciences de Berlin*, 13, 252 (1759)

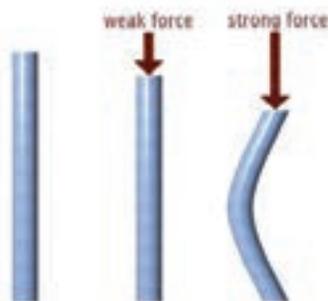


Figure: Elastic rod compressed by a force of increasing strength

08/08/2019

Иллюстрация спонтанного нарушения симметрии.

1.1) A successful example

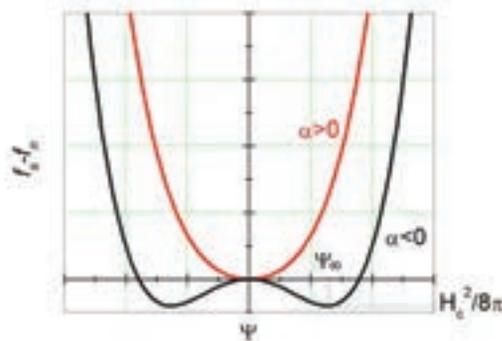
Ginzburg-Landau theory from 1950 offered a macroscopic (ie effective) theory for conventional superconductivity,

$$V(\Psi) = \alpha(T)|\Psi|^2 + \beta(T)|\Psi|^4 \quad \alpha(T) \approx a^2(T - T_c) \quad \text{and} \quad \beta(T) \approx b^2$$

In 1957 Bardeen, Cooper and Schrieffer provided the microscopic (fundamental) theory that allows one to

- 1) interpret $|\Psi|$ as the number density of Cooper pairs
- 2) calculate coefficients of $|\Psi|^2$ and $|\Psi|^4$ in the potential.

Jan Low
Argonne/Northwestern/CERN

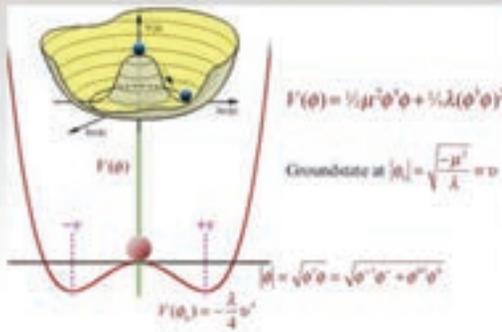


08/08/2019

M. Gouzevitch, JINR seminar, « Higgs Physics »

Теория Гинзбурга-Ландау с 1950 г. предложила макроскопический механизм для обычной сверхпроводимости. В 1957 г. Бардин, Купер и Шриффер создали микроскопическую теорию.

1.2) SM and BEH mechanism



- After EWSB the extra degrees of freedom of Higgs doublet from the potential are redefined through a proper gauge into W^\pm , Z mass.
- Yukawa coupling gives mass to fermions.

$$\mathcal{L}_{\text{higgs}}(\phi, A_\mu, \psi_i) = D\phi^\dagger D\phi - V(\phi)$$

$$V(\phi) = -\mu^2\phi^\dagger\phi + \lambda(\phi^\dagger\phi)^2 + Y^i\psi_L^i\psi_R^j\phi$$

08/08/2019

M. Gouzevitch, JINR seminar, « Higgs Physics »

Стандартная модель (СМ) и механизм Хиггса (BEH mechanism - Brout-Englert-Higgs mechanism).

1.3) Potential reformulation

We can rewrite the BEH potential as with 3 fundamental parameters that are related

$$V = -m_H^2 |H|^2 + \lambda |H|^4 \quad \text{and} \quad \lambda = m_H^2 / 2 v^2$$

1) m_H can be interpreted as the mass of the Higgs field. It is directly measured once Higgs boson is discovered.



2) λ is the Higgs boson field self coupling constant. It gives the intensity of $H^* \rightarrow HH$ and $HH \rightarrow HH$ interactions. The hardest to measure.

3) v is the vacuum expectation value and it is measured indirectly and very precisely at low energy looking on beta decays

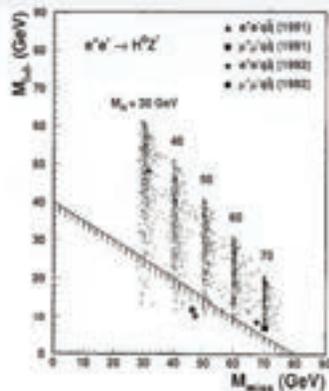
$$v = 2^{-1/4} \cdot G_F^{-1/2} \approx 246 \text{ GeV}$$

08/08/2019

M. Gouzevitch, JINR seminar, « Higgs Physics »

Величину m_H можно интерпретировать как массу поля Хиггса. После «теоретического» открытия бозона Хиггса она была непосредственно измерена.

2) Situation before the LHC



08/08/2019

Ситуация, которая была до создания LHC.

2.1) Dark age times

- 1) EWSB proposed in 60-ies
- 2) No significant constraints existed till 70-ies: only indirect through neutron stars or nuclear physics.

We should perhaps finish our paper with an apology and a caution. We apologize to experimentalists for having no idea what is the mass of the Higgs boson, ..., and for not being sure of its couplings to other particles, except that they are probably all very small. For these reasons, we do not want to encourage big experimental searches for the Higgs boson, but we do feel that people doing experiments vulnerable to the Higgs boson should know how it may turn up.

— John R. Ellis, Mary K. Gaillard, and Dimitri V. Nanopoulos, [8]

08/08/2019

M. Gouzevitch, JINR seminar, « Higgs Physics »

До 70-х годов не имелось никаких существенных ограничений на существование бозона Хиггса. Были только косвенные указания, связанные с нейтронными звездами или ядерной физикой.

2.2) Higgs in accelerators era: pre-LHC



**LEP e+e-
209 GeV (CERN)**

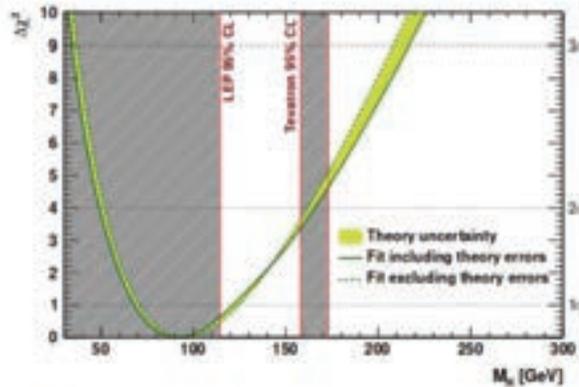
- Z factory
- $m_H > 114 \text{ GeV}$

**TEVATRON p+p-
1.96 TeV (USA)**

- W, Z factory
- $M \sim 175 \text{ GeV}$
- $M_H \neq 2 M_W$



- LEP:
 $e+e- \rightarrow ZH$
- TEVATRON:
 $q\bar{q} \rightarrow ZH/WH$
- Indirect constrains through the EWK corrections.

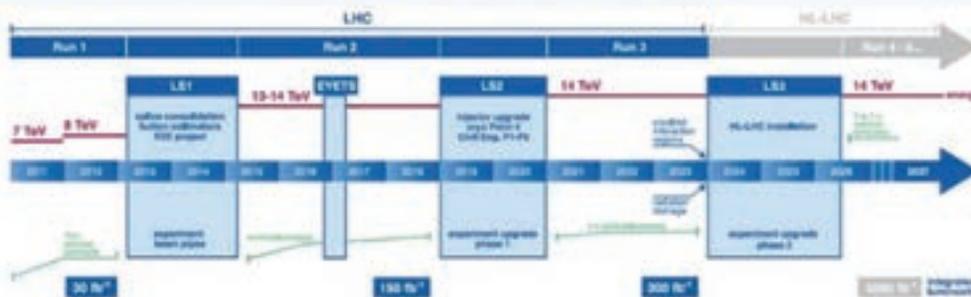


08/08/2019

M. Gouzevitch, JINR seminar, « Higgs Physics »

Проблема Хиггса в эпоху ускорителей: до LHC.

3) Higgs Hunting at the LHC



08/08/2019

Охота на бозон Хиггса на Большом адронном коллайдере (LHC).

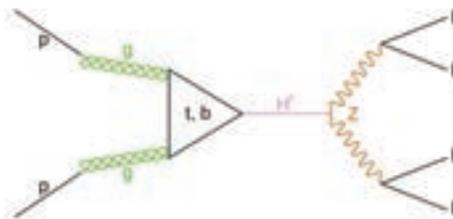
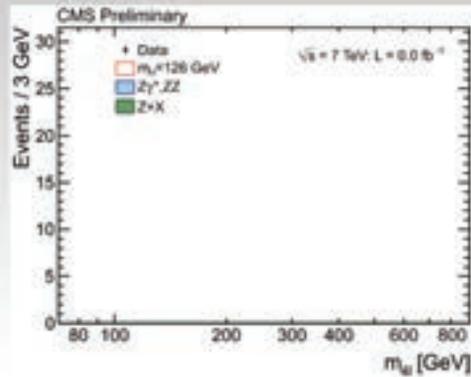
3.1) Higgs discovery

- 4 July 2012: Higgs boson discovery by ATLAS – CMS from LHC
- 2013: Nobel prize to theorist (Englert-Higgs, Brout died before) in 2013.
- 2014: Cherenkov prize of Russian Academy of Science to Igor Golutvin (CMS) and Aleksandr Zaitsev (ATLAS) for « Major contribution to CMS and ATLAS experiments at the LHC, qui ont permi la découverte du boson de Higgs »



08/08/2019

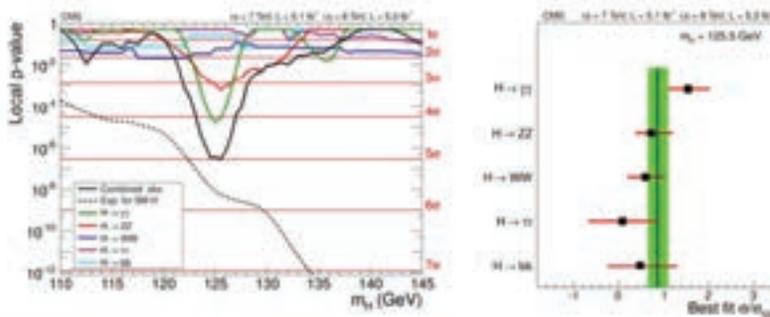
M. Gouzevitch, JINR seminar, « Higgs Physics »



4 июля 2012 года было сообщено об открытии бозона Хиггса в экспериментах CMS и ATLAS.

3.2) What did we learned first

- Production mechanism: gluon-gluon fusion. H is the only particle that was discovered through the loops!
- Higgs boson was discovered in VV channels: $H \rightarrow ZZ$, $(H \rightarrow WW)$, $H \rightarrow \gamma\gamma$. Production and decay in these compatible with EWSB prediction from BEH mechanism:
 - Higgs boson exist with a mass compatible with EWK fits and the « scalar » hypothesis is preveledged by the data.
 - BEH mechanism is responsible of at least 70% of EWSB.
 - Indirectly we see that top quark mass is generated by Yukawa coupling.



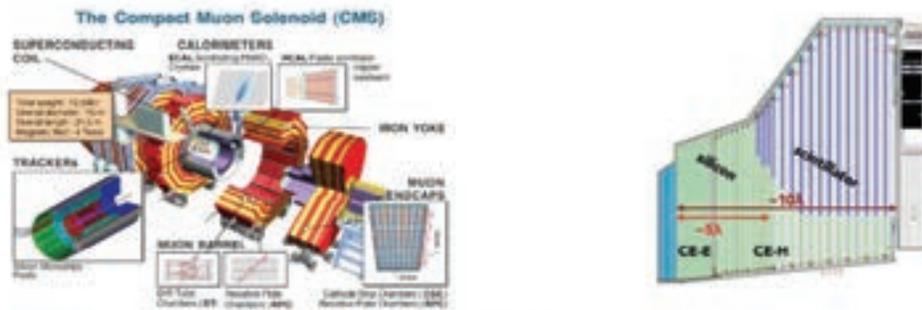
08/08/2019

M. Gouzevitch, JINR seminar, « Higgs Physics »

Механизм рождения Хиггс бозона: глюон – глюонное слияние. Хиггс бозон был открыт в каналах $H \rightarrow ZZ$, $H \rightarrow WW$, $H \rightarrow \gamma\gamma$.

3.3) Contribution of I. G. and RDMS to H discovery

- Higgs boson discovery detectors: ECAL+tracker (photons, electrons) and Muon+Tracker system where RDMS and Igor Golutvin played a key role.
- The Vector-Boson Fusion production is the most interesting channel for EWSB understanding. It is characterized by forward jets, relying on Endcap Hadronic calorimeter that is also an RDMS and I.G. “baby”.
- HL-LHC forward ECAL would be fully silicon as pioneered by Dubna Silicon program (I.G. spokesperson) and RD35 program already in 1992-94.



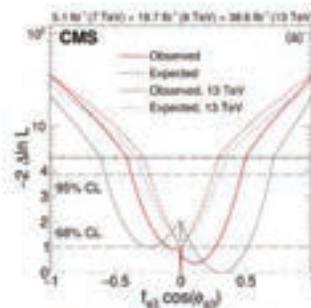
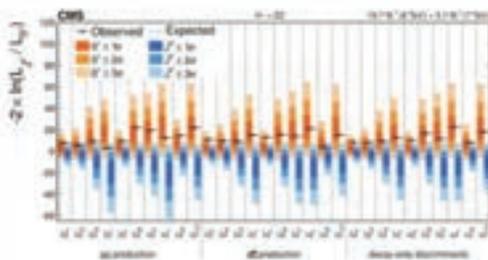
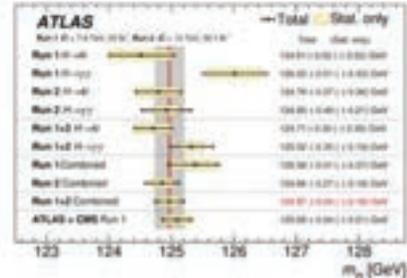
08/08/2019

M. Gouzevitch, JINR seminar, « Higgs Physics »

В открытии бозона Хиггса важное значение имели электромагнитный калориметр и мюонная система, в которых группа RDMS и И.А. Голутвин играли ключевые роли.

3.4) H boson properties: Run II

- Measure precisely the Higgs mass and validate its compatibility between $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow ZZ$, at 8 TeV and 13 TeV. ✓
- Validation of scalar nature of Higgs boson from angular distribution: spin-0, even parity. ✓



95% CL excluded pseudo-scalar contribution

08/08/2019

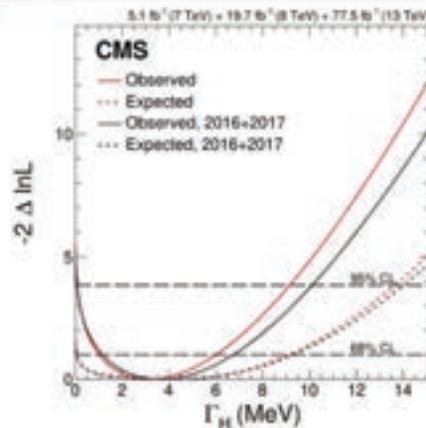
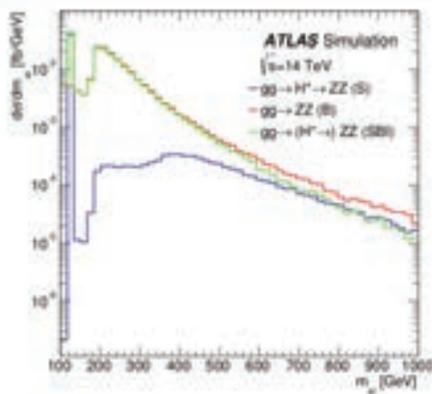
M. Gouzevitch, JINR seminar, « Higgs Physics »

За время проведения RUN II была точно измерена масса бозона Хиггса и подтверждена его скалярная природа.

3.5) H boson properties: Run II



- Direct measurement of Higgs width is limited by the statistics and lepton energy scale at the LHC.
- Think-out-of-box approach: fortunately Higgs couples to the mass: when $H^* \rightarrow ZZ$ ($H^* \rightarrow WW$) off-shell channels opens there is a significant increase of the cross section. Through the interference with ZZ continuum we can constraint total on-shell Higgs width in a model dependent way.
- HL-LHC projections: $\Gamma_H^{(LZ)} = 4.2^{+1.5}_{-2.1}$ MeV (stat+sys).



08/08/2019

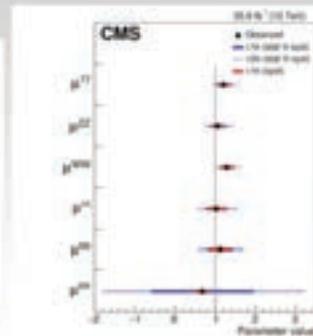
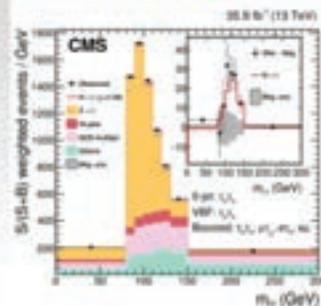
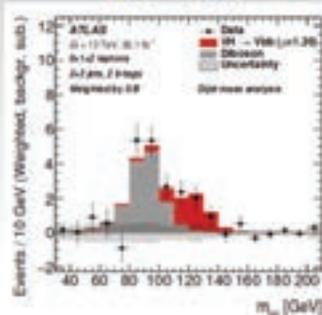
M. Gouzevitch, JINR seminar, « Higgs Physics »

Прямое измерение ширины бозона Хиггса ограничено статистикой и масштабом энергии лептонов на LHC.

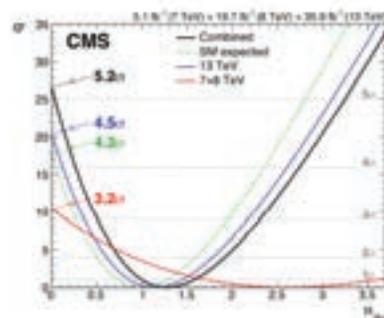
3.6) 3rd generation

$VH \rightarrow bb$ ✓

$H \rightarrow \tau\tau$ ✓



- Run II+Run I provides per experiment observation of 3rd generation Yukawa couplings.
- BEH mechanism is responsible at least at 50-70% of the 3rd generation mass.



08/08/2019

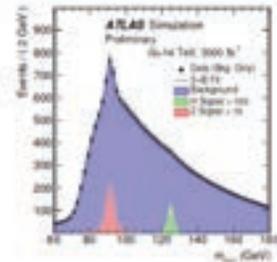
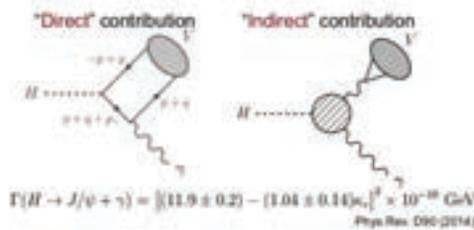
M. Gouzevitch, JINR seminar, « Higgs Physics »

Механизм Браута-Энглерта-Хиггса отвечает как минимум за 50-70% массы.

3.7) 2nd generation

- With b-tagging $H \rightarrow bb$ is already challenging, with c-tagging $H \rightarrow cc$ is nearly impossible.
- Alternative idea with exclusive decays appeared to me a way more challenging than initially expected.
- Little chance to provide a « measurement » at the LHC. 🤖

- ☑ $h \rightarrow Q\bar{Q}$ decays: clean probe for Higgs-quark couplings for 1st/2nd generation quarks
 - ▷ Q is a vector meson or quarkonium state
- ☑ Two contributions: direct and indirect amplitude
 - ▷ Direct amplitude: provides sensitivity to Higgs-quark couplings
 - ▷ Indirect amplitude: insensitive to Higgs-quark couplings: larger than direct amplitude
 - ▷ Destructive interference



08/08/2019

M. Gouzevitch, JINR seminar, « Higgs Physics »

Вторая генерация фермионов.

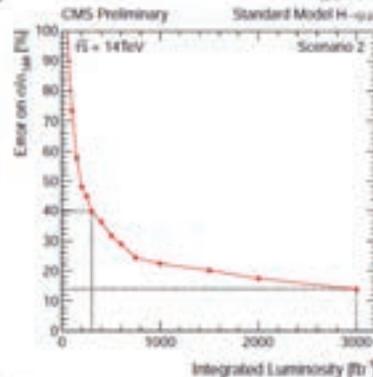
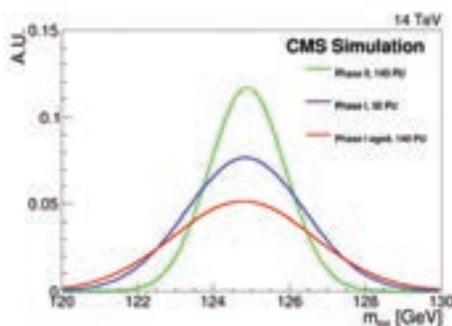
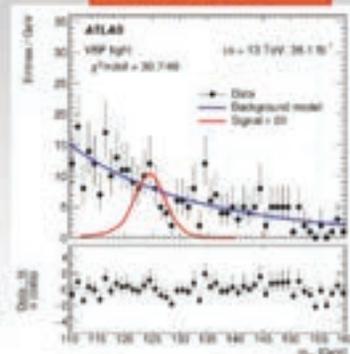
3.8) 2nd generation



arXiv:1705.04582



- $H \rightarrow \mu\mu$:
 - We have to fight against large DY background: important mass resolution.
 - We need to maximize statistics: muons acceptance is important.
- Muon system critical → Important RDMS role for forward Muon system.
- Actual situation: 2-3 times SM.
- HL-LHC: can reach 10 %.

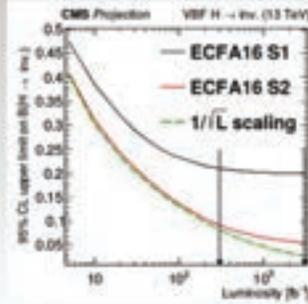
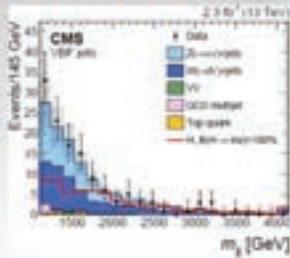


08/08/2019

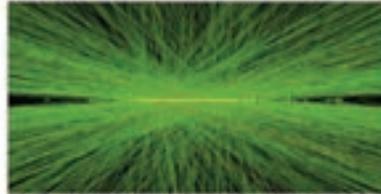
M. Gouzevitch, JINR seminar, « Higgs Physics »

Для измерений по второй генерации фермионов важное значение имеет разрешение по массе димюонов, обеспечиваемое торцевой мюонной системой.

3.9) H → Invisible



- The H → invisible is measured assuming SM Higgs production cross section.
- Critical to constraint Dark Matter oriented models.
- The Run I + 2015 limit is 25%.
- HL-LHC: limit on 5-10% >> BR(SM H). Limited by MET degradation with large pile-up (200 PU/event).



08/08/2019 M. Gouzevitch, INR seminar, « Higgs Physics »

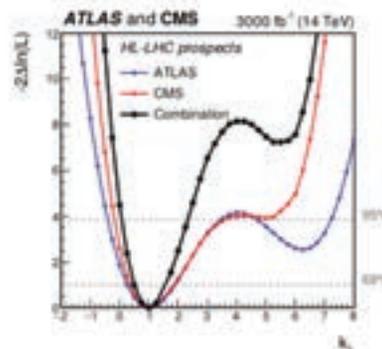
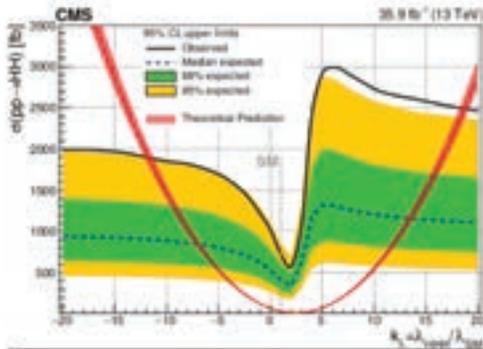
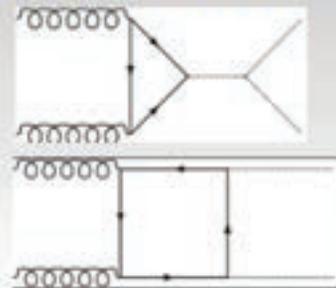
H → невидимые моды распада.

Распад H на невидимые моды регистрируется при условии, что сечение рождения Хиггса берется из Стандартной модели. Это критически важно для моделей, ориентированных на Темную материю.

3.10) BEH potential

- Direct constraint on the potential theoretically possible through HH production:
 - The cross section 1000 times smaller than SM H.
 - Cross section dominated by top box digram, the sensitivity to Higgs self coupling is reduced.

$$V = -m_H^2 |H|^2 + \lambda |H|^4$$



08/08/2019 M. Gouzevitch, INR seminar, « Higgs Physics »

Потенциал Браута-Энгдerta-Хиггса.

4) Future colliders

e+e- linear
 ILC 250, 350, 500 GeV (JAPAN)
 CLIC 380-3000 GeV (CERN)



e+e- circular
 CEPC 240 GeV (CHINE)
 FCC-ee 90-350 GeV (CERN)

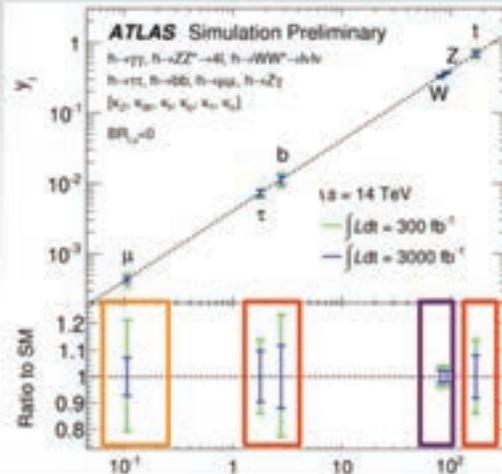
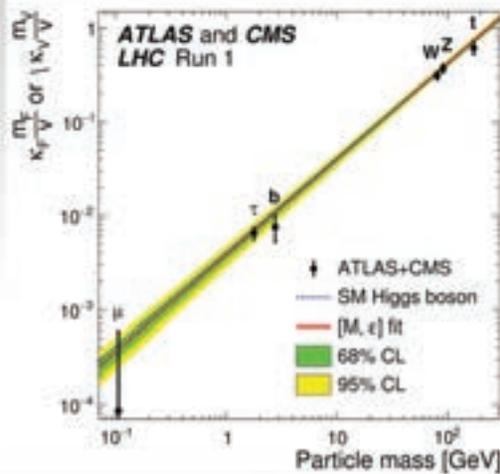


p+p+
 CEPC ~ 50-70 TeV (CHINE)
 HE-LHC ~ 30 TeV (CERN)
 FCC-pp ~ 100 TeV (CERN)

08/08/2019

Будущие коллайдеры: ILC (Япония), CLIC (ЦЕРН), CEPC (Китай), FCC (ЦЕРН).

4.1) HL-LHC impact



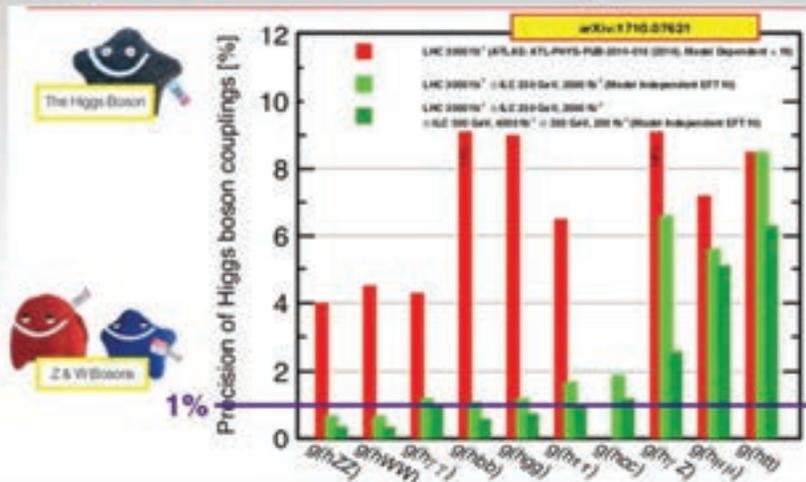
- Assuming no new physics in $\Gamma_{\text{tot}}^*(\sigma \cdot \text{BR})(x \rightarrow H \rightarrow f) = \frac{\sigma_x \cdot \Gamma_f}{\Gamma_{\text{tot}}}$
- W/Z sector and 3rd generation: most of the improvement comes from Phase I. Phase II limited by systematics (experimental and theory).
- 2nd generation (μ): Phase II opens the gate (Carlo R. would be happy).

08/08/2019

M. Gouzevitch, JNR seminar, « Higgs Physics »

Ожидания от HL-LHC (ЛХС с высокой светимостью).

4.2) Lepton colliders



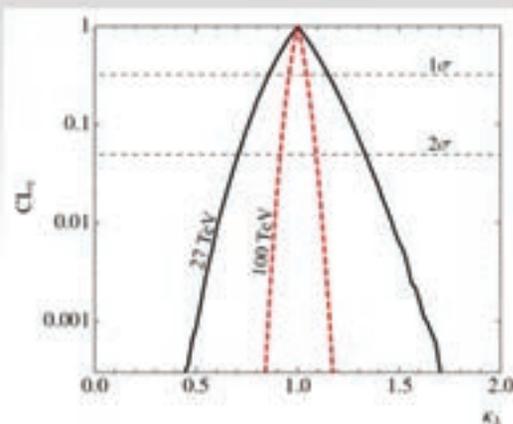
- Measure the couplings Bosons, 3rd generation with 1 % precision necessary to exclude weak BSM physics below 1 TeV.
- Measure 2nd generation with 5% precision.
- Measure in a model independent way: total width, total production / decay fractions.

08/08/2019

M. Gouzevitch, JINR seminar, « Higgs Physics »

Лептонные коллайдеры.

4.3) High energy hadron colliders: Higgs physics



- Measure the Higgs potential parameters.
- High p_T probes: Measure the longitudinal vector boson scattering – unitarisation with BEH mechanism.

08/08/2019

M. Gouzevitch, JINR seminar, « Higgs Physics »

Адронные коллайдеры высокой энергии: Хиггс физика.

CONCLUSION

- The LHC discovery opened a door to the understanding of the BEH mechanism.
- Despite what one can think we doesn't know it so well yet. There is a huge program to be performed before claiming:
“BEH is THE EWSB mechanism and is THE origin of fermion masses and is / is not the portal to Dark Matter»
 - 2nd generation Yukawa
 - Shape of BEH potential
 - Unitarization of longitudinal scattering
 - Invisible and rare decays.
 - 1st generation!
 - Branchings with 1% precision at least.
- All the projects of future colliders position themselves at least partially as Higgs factories.
- RDMS and I. Golutvin played a key role since 30 years in this adventure and a lot remains to be done.

08/08/2019

M. Gouzevitch, JINR seminar, « Higgs Physics »

Большой адронный коллайдер открыл дверь к пониманию механизма Браута-Энглера-Хиггса (ВЕН). Все проекты будущих коллайдеров позиционируют себя, по крайней мере частично, как фабрики бозонов Хиггса. RDMS коллаборация и И.А. Голутвин 30 лет играли ключевую роль в этом процессе и им много еще предстоит сделать.

П. де Барбаро

Университет Рочестер, США



Калориметрия CMS: прошлое и будущее

CMS Endcap calorimetry: Past, Present and the Future

[International Scientific Seminar](#)
["Experimental Methods in Particle Physics"](#)

Dubna, Russia
August 8, 2019

Pawel de Barbaro,
University of Rochester, USA



Aug 8th, 2019 Pawel de Barbaro, University of Rochester

Торцевая калориметрия CMS: прошлое, настоящее и будущее.

Hadron Endcap calorimeter Manufacturing Sites



Производственные площадки торцевого адронного калориметра.

“Beat their swords into plowshares”

The RDMS groups, under leadership of Igor A. Golutvin made major contributions to the design and construction of HE (mechanics and optics) and mechanics of Hadron Forward (HF).

- Mechanical design by NIKIET including connection to endcap yoke
- Brass absorber plates were rolled in IZHORA of St. Petersburg
- Machined and pre-assembled in MZOR of Minsk
- Scintillator megatiles machined at Kharkov
- Megatiles assembled and tested in Protvino

“And he shall judge among the nations, and shall rebuke many people: and they shall beat their swords into plowshares, and their spears into pruninghooks: nation shall not lift up sword against nation, neither shall they learn war any more. (Isaiah 2:4)”



«Перековали свои мечи на орала»

HE Installation at CERN

The HE installation team was lead by Vitali Kaftanov of Moscow - ITEP. His team included V. Smirnov (engineer from Dubna, Alexander Vishnevsky (also an engineer) and A.Volkov (physicist from Protvino)

The Megatiles were installed into the slots of the brass Matrix. The WLS fiber was Connected to Readout Boxes (RBXs) via clear fiber.



Мегатайлы устанавливались в пазы латунной матрицы. Спектрсмещающие волокна подключались к считывающему устройству.

HCAL Endcap: Design and Manufacture

Long list of names of physicists and engineers from Dubna, Protvino, Minsk, Moscow, Kharkov, Sophia, ..., who participated at the design and construction stage of CMS Hadron Endcap calorimeter.

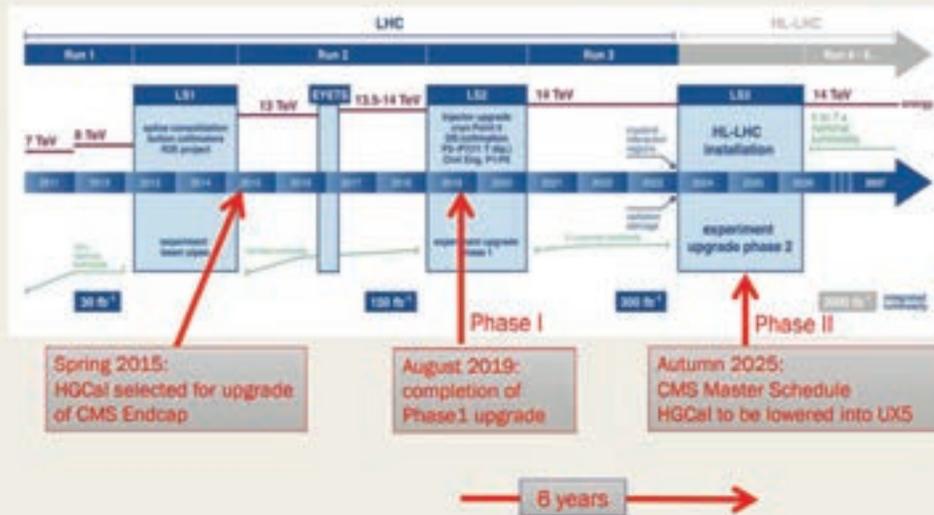
PROTVINO-ITEP 1. Abramov Victor 2. Korabely Andrey 3. Korovin Taty 4. Korotkiy-Alexander 5. Kravchenko Victor 6. Turchanovskiy Leonid 7. Volkov Alexey 8. Lavrenko Andrey 9. Sushkov Alexander 10. Evtushenko V. 11. Markov A. 12. Potapov V. 13. Sazonov A. 14. Sushchikov Z. 15. Shchegolev E. 16. Lounin Andrey 17. Adukhin Igor	<ol style="list-style-type: none"> 1. Design of HE first prototypes and 20degree PPT2 2. Design of HE absorbers 3. Design of HE/VE interfaces and integration 4. Design of tiles, megatiles, and optical system - cables 5. Design of laser control system 6. Design of stands for pig tail and megatile quality test 7. Design of megatron stand for Al-coat of the fiber ends 8. Radiation calculations 	DUBNA 1. Erenov Yuri 2. Golubev Igor 3. Gromov Alexander 4. Kalugin Vladimir 5. Lyapunov Vladimir 6. Kozlov Ivan 7. Mikhlinchuk Igor 8. Mironov Petr 9. Sergeev Sergey 10. Ushakov Anton 11. Zorotin Anatoli et al	MOSCOW-ROME 1. Druzhinin Dmitry 2. Savvin Alexander 3. Kuznetsov Vladimir 4. Chir Alexander 5. Smetanin Vladimir et al	KHARKOV-UC 1. Green Boris 2. Lyubimsky Maxim 3. Serdyukov Vitaly et al	<ol style="list-style-type: none"> 1. Manufacturing of brass for absorbers in "Krasny Vityazhsta" 2. Manufacturing and pre-assembly of HE absorbers in Minsk MZOR 3. Manufacturing of HE/VE interfaces in Minsk MZOR 4. Supervision and quality acceptance control for mechanics manufacturing 5. Production of tiles and megatiles <ul style="list-style-type: none"> - Production of stands for fiber ends coat, pig tail, and megatile and pig tails quality test and control - Production and quality test of megatiles during production and after transportation at CERN 6. Production of laser control system and optical cables 7. Production of HE prototypes 8. Production of HV system 	DUBNA 1. Golubev Igor 2. Kalugin Vladimir 3. Mikhlinchuk Igor 4. Ushakov Anton 5. Zorotin Anatoli et al	MINSK-ROME 1. Smolenskiy Igor 2. Lyapunov Vladimir 3. Shurubko Nikolai 4. Chir Alexander 5. Smetanin Vladimir et al	MOSCOW-ROME 1. Druzhinin Dmitry 2. Savvin Alexander 3. Kuznetsov Vladimir 4. Chir Alexander 5. Smetanin Vladimir et al	KHARKOV-UC 1. Green Boris 2. Lyubimsky Maxim 3. Serdyukov Vitaly et al	PROTVINO-ITEP 1. Korabely Andrey 2. Korovin Taty 3. Korotkiy-Alexander 4. Kravchenko Victor 5. Markov A. 6. Potapov V. 7. Sazonov A. 8. Sushchikov Z. 9. Shchegolev E. 10. Turchanovskiy Leonid 11. Volkov Alexey 12. Zorotin Anatoli
---	---	---	---	---	--	--	--	---	---	--

Aug 8th, 2019

Power of Barbara, University of Rochester

Длинный список имен физиков и инженеров из Дубны, Протвино, Минска, Москвы, Харькова, Софии, ..., участвовавших в проектировании и строительстве адронного торцевого калориметра CMS.

The future at CERN: High Luminosity LHC Timeline



Aug 8th, 2019

Pavel de Barbaro, University of Rochester

Будущее ЦЕРН: развитие Большого адронного коллайдера с высокой светимостью.

Signal loss of HE calorimeter vs Int. Luminosity

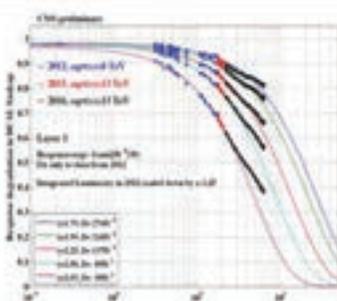
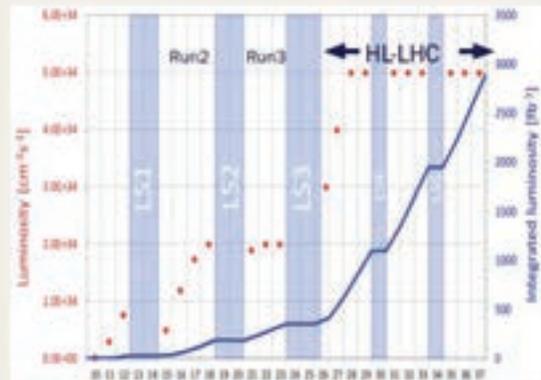


Figure 2.16: Response loss in HE Layer I for various η towers, averaged over all η towers, as a function of integrated luminosity. The response was normalized to the signal at the beginning of 2012. The normalization for LHC intensity variation was obtained using the lowest η ring.



Both Hadron Endcap (HE) with scintillator/WLS fiber readout and Electromagnetic Endcap (EE) with Lead tungstate crystals were designed for integrated luminosity of 500 fb^{-1} . Radiation damage to active elements of present CMS Endcap detectors much beyond this integrated luminosity would lead to performance degradation, and in effect, unacceptable loss of physics performance.

Aug 8th, 2019

Pavel de Barbaro, University of Rochester

Радиационные повреждения активных элементов существующего торцевого детектора CMS становятся намного больше при росте интегральной светимости, что приведет к ухудшению рабочих характеристик и, по сути, к неприемлемой потере физических характеристик.

Expected doses and fluence in CMS endcap region after 3000 fb⁻¹

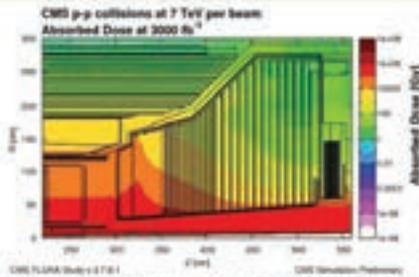


Figure 1: Dose of ionizing radiation accumulated in HGCal after an integrated luminosity of 3000 fb⁻¹, simulated using the FLUKA program, and shown as a two-dimensional map in the radial and longitudinal coordinates, r and z.

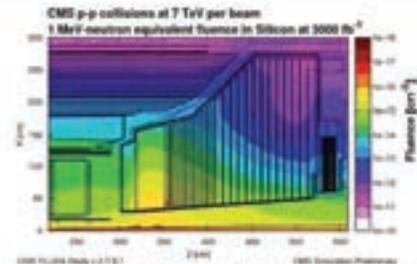


Figure 2: Fluence, parameterized as a fluence of 1 MeV equivalent neutrons, accumulated in HGCal after an integrated luminosity of 3000 fb⁻¹, simulated using the FLUKA program, and shown as a two-dimensional map in the radial and longitudinal coordinates, r and z.

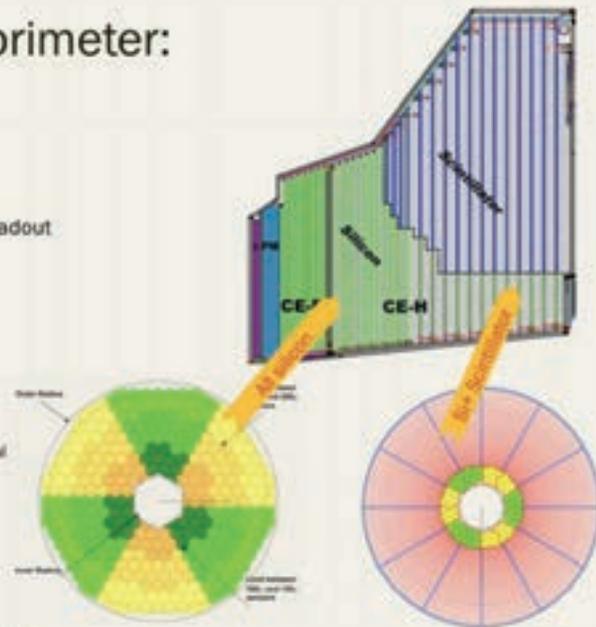
The replacement will need to tolerate up to 200 Mrad after 3000 fb⁻¹, and a fluence of 10¹⁶ n/cm². It will also require good signal to noise ratio for minimum-ionizing particles for accurate calibration throughout HL-LHC.

Aug 8th, 2019 Pavel de Barbaro, University of Rochester

Ожидаемые дозы и поток в торцевой области CMS после достижения светимости 3000 fb⁻¹. После модернизации детектор должен выдерживать 200 Мрад после достижения 3000 fb⁻¹ и нейтронный поток в 10¹⁶ n/cm².

High Granularity calorimeter: key features

- Sampling calorimeter
- Unprecedented transverse and longitudinal readout segmentation
 - Silicon in high radiation areas
 - Scintillating tiles in the low-radiation region
- Covering 1.5 < η < 3.0, operated at -30 °C
- Nomenclature
 - HGCal = High Granularity Calorimeter
 - CE = Calorimeter Endcap (official CMS name) = HGCal
 - CE-E = Calorimeter Endcap - electromagnetic section
 - CE-H = Calorimeter Endcap - hadronic section



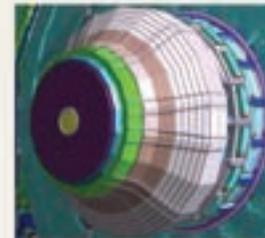
Aug 8th, 2019 Pavel de Barbaro, University of Rochester

Калориметр высокой гранулярности: ключевые характеристики.

High Granularity calorimeter: absorber and active material

Per endcap	CE-E	CE-H (Si)	CE-H (Si + Scint)
Active	Silicon sensors		Scintillators
Absorber	Pb, CuW, Cu		Stainless steel, Cu
Depth	26 X_0 , 1.7 λ , 34 cm		9 λ
Layers	28	8	16
Weight	23 t	205 t	

For both endcaps	Silicon sensors	Scintillators
Area	600 m ²	500 m ²
# Modules	27,000	2500
Channels Size	0.5-1 cm ²	4-30 cm ²
# Channels	6 Mio	400k
Op. temperature	-30 °C	-30 °C



Aug 8th, 2019 Pawel de Barbaro, University of Rochester

Калориметр высокой гранулярности: поглотитель и активный материал.

Silicon and SiPM-on-Scintillator Modules

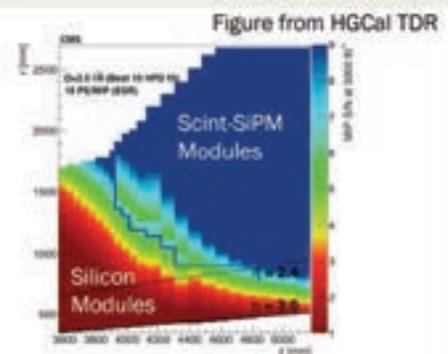
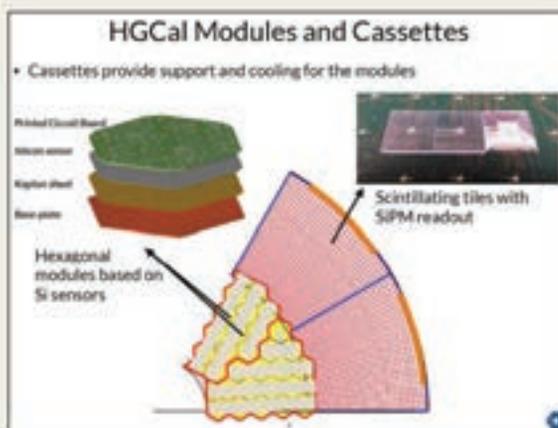


Figure 2.14: Signal-to-noise ratio for a MIP after an integrated luminosity of 3000 fb⁻¹, shown as a two-dimensional map in x and z . The region, at larger x and z , in which SiPMs mounted on scintillator tiles can provide $1/(N/MIP) > 5$ after 3000 fb⁻¹ is outlined.

Aug 8th, 2019 Pawel de Barbaro, University of Rochester

Кремниевые модули и модули из сцинтилляторов с кремниевыми фотоумножителями (SiPM).

Contributions of RDMS groups to the design of HGICAL

Under leadership of Igor Golutvin, Dubna group contributes to the design of future CMS endcap calorimeter, HGICAL

- Participation in the radiation damage of Scintillator tiles with direct SiPM readout
- Development of a technique of manufacturing and assembling of scintillator tiles and SiPM readout
- Prototype cooling plate for CE-H cassettes
- Other contributions

Aug 8th, 2019

Pavel de Barbaro, University of Rochester

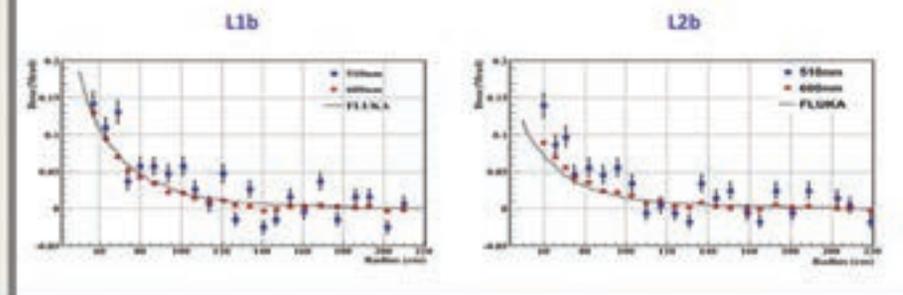
Под руководством Игоря Голутвина группа Дубны участвует в разработке будущего торцевого калориметра высокой гранулярности HGICAL для CMS.

S.V. Kalashnikov¹, A. Yu. Boyarintsev², Yu. V. Ershov¹, I. A. Golutvin¹, N. V. Gorbunov¹, A. I. Malakhov¹, V. A. Smirnov¹, N. I. Zamyatin¹

¹JINR, Dubna, Russia
²University for Scientific Studies (Utrecht), Utrecht, the Netherlands

Absorbed dose measured by film dosimeters in the HE calorimeter

Installation of several rows of film radiachromic dosimeters (FWT-60):
two measurement sets along L1 megatiles and two sets along L2 megatiles.



Aug 8th, 2019

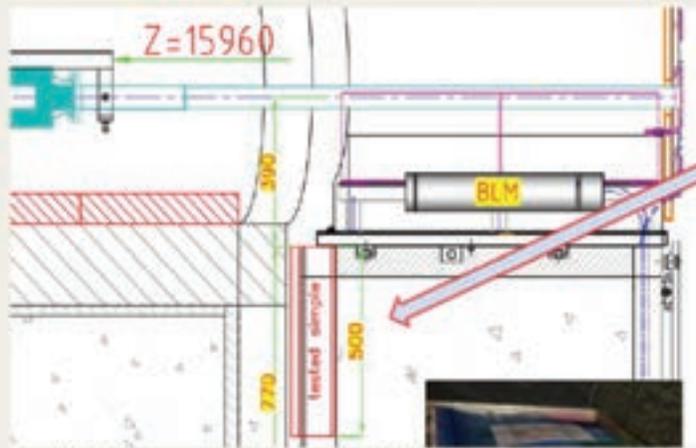
Pavel de Barbaro, University of Rochester

15

Поглощенная доза, измеренная дозиметрическими пленками в зоне установки калориметра.

Castor Radiation Facility (CRF) at CMS

CRF was located in very forward region of CMS allowed to carry out radiation damage studies of Scintillator prototypes for Scint-SiPM section of HGICAL.



Aug 8th, 2019 Pavel de Barbaro, University of Rochester

CRF Tower Assembled



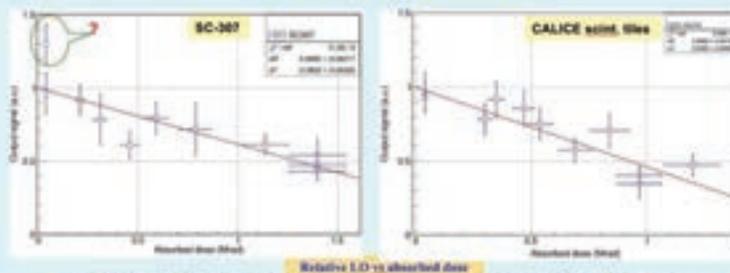
Inside CASTOR Vertical Slot



Зона CRF(Castor Radiation Facility) расположена в самой передней части CMS, что позволило провести исследования радиационных повреждений прототипов сцинтилляторов.

Scintillator tiles LO measurements at CERN cosmic rays setup (Sc307 & "Calice" type)

Data acquisition were provided by Dubna team (Sergey Afanasev et al.).
SiPM - MPPC S12572 -015P with active area 3x3 mm² (room temperature)
(Data processing from Protvino team)



LO degradation at the level of absorbed dose:
0.5 Mrad is about of 20%;
1 Mrad - ~40%

LO degradation at the level of absorbed dose:
0.5 Mrad is about of 30%;
1 Mrad - ~50%

Castor Radiation Facility at CMS:
Collaborative effort of Dubna, INR,
Protvino and Rochester groups

At CRF, dose of 0.5 Mrad was delivered with rate of 0.5 krad/hr.

At HGICAL, for the dose of 0.5 Mrad we expect rates ~ x20 lower!

Based on CMS-HE data, we would expect dose constant to be ~ x4-5 smaller, implying damage will be larger.

Andrei Uzumyan

HGICAL SiPM-on-Tile Meeting, 22 May 2019

8

Aug 8th, 2019

Pavel de Barbaro, University of Rochester

На CRF доза 0,5 Мрад накапливалась со скоростью 0,5 крад/час. На HGICAL для дозы 0,5 Мрад мы ожидаем, что показатели будут примерно в 20 раз ниже.

Prototype of macro-tile developed at Dubna

Prototype modules were designed and built in Dubna. Modules were also provided to CERN, FNAL and DESY for parallel tests and evaluation.

S.V.Afanasiev¹, A.Yu.Boyarintsev², M.V.Danilov^{3,4}, Yu.V.Ershov¹, I.A.Golutvin¹, N.V.Gorbunov³, B.V.Grynyov², A.I.Malakhov³, E.V.Popova⁴, V.A.Smirnov¹, B.S.Yuldashev⁵, N.I.Zamyatin¹, A.V.Zarubin¹

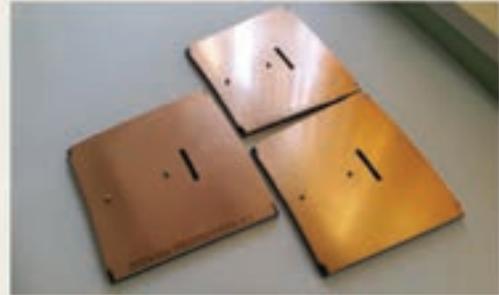
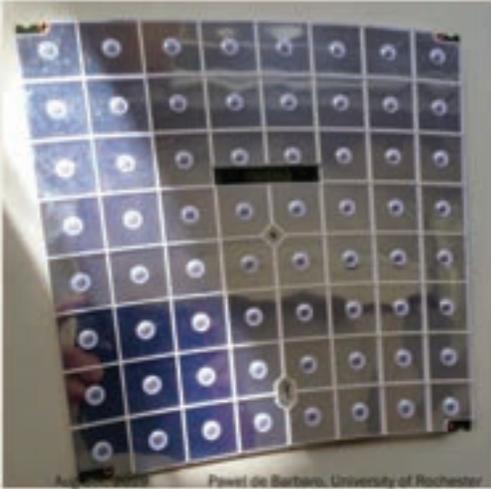
¹ JINR, Dubna, Russia

² Institute for Scintillation Materials (ISM), Kharkov, Ukraine

³ Lebedev Physical Institute (LPI), Moscow, Russia

⁴ National Research Nuclear University (MEPhI), Moscow, Russia

⁵ Institute of Nuclear Physics (INP), Tashkent, Uzbekistan

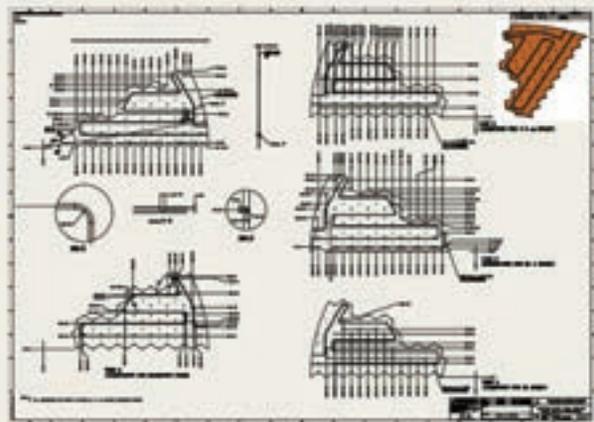


В Дубне созданы опытные образцы модулей. Модули были направлены в ЦЕРН, ФНАЛ и ДЕЗИ для параллельных тестов и сравнения.

Example of other contributions to HGCal by RDMS groups: copper cooling plates for CE-H

Last year, Minsk group has produced several small size prototypes of cooling panels for studying and mastering the technological process of production of this product.

This year, they are preparing full size prototype cooling plate for CE-H.



July 11, 2019

Pavel de Barbaro, University of Rochester

В прошлом году минская группа изготовила несколько малогабаритных прототипов охлаждающих панелей для изучения и освоения технологического процесса производства этого продукта.

Last slide

Under Igor Golutvin's leadership RDMS has provided critical contributions to the development of CMS endcap calorimetry at the initial stage of its design in 1990-ties, during construction in early 2000s, as well as throughout the years of operation of the detector.

We are now preparing CMS or High-Luminosity upgrade of LHC. High Granularity Calorimeter is designed to be a superb detector providing an unprecedented amount of information, but it is also obvious that realizing this detector involves serious technical challenges.

RDMS groups participate to the design effort of Scintillator/SiPM section of HGCAL.

Thank you Igor for years of your involvement, your wisdom and leadership role in this effort.

Aug 8th, 2018

Fabrizio de Barbaro, University of Rochester

Последний слайд. Под руководством Игоря Голутвина группа RDMS внесла важный вклад в развитие торцевой калориметрии CMS на начальном этапе её проектирования в 1990-х годах, во время создания в начале 2000-х годов, а также на протяжении многих лет эксплуатации детектора.

О.В. Теряев

Начальник научно-экспериментального отдела физики столкновений тяжелых ионов на комплексе NICA ОИЯИ



Спиновая и Новая физика на CMS

Поляризационные данные часто становились кладбищем модных теорий. Если бы теоретики добились своего, они могли бы просто полностью запретить такие измерения в целях самозащиты.

Polarization data has often been the graveyard of fashionable theories. If theorists had their way, they might just ban such measurements altogether: out of self-protection.
J.D. Bjorken
St. Croix, 1987

Main Topics

- Spin and invariants of angular distributions
- Virtual photon/graviton polarization at CMS
- Missed transverse momentum angular distributions and probes of dark matter

Основные темы доклада:

- спин и инварианты угловых распределений;
- виртуальная фотонно/гравитонная поляризация на CMS;
- угловые распределения по недостающему поперечному импульсу и пробники темной материи.



Spin and angular distributions at CMS

- 2005: Invitation of I.A. Golutvin to participate in CMS activity and to visit CERN
- Model-independent search of new physics?
- Possible role of spin and angular asymmetries (less sensitive to pdfs – to be measured from xsections)

Спин и угловые распределения в CMS.

В 2005 г. докладчик получил приглашение от И.А. Голутвина участвовать в проекте CMS и посетить ЦЕРН для решения задач: поиск модельно независимой новой физики и возможная роль спина и угловых асимметрий.

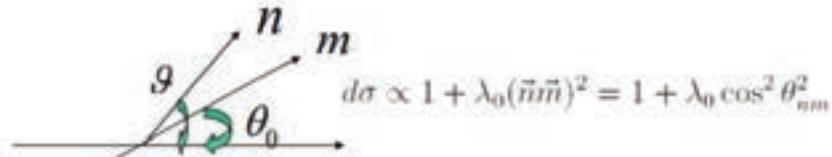


Angular distributions

- SM gauge bosons: detailed check of production mechanisms
- Higgs – spin 0 – isotropic distributions
- Gravitons – spin 2 – 4 component density matrix – $\cos^4\theta$ enters – searched for and not found (CMS: S. Shmatov, M. Savina)
- Any s-channel resonance – slow decrease with angle/transverse momentum
- How to measure (frame)?

Угловые распределения позволяют изучать широкий круг явлений. В частности возможна детальная проверка механизма рождения калибровочных бозонов Стандартной модели и других параметров этой модели.

Kinematic azimuthal asymmetry from polar one (OT'05)



Only polar asymmetry with respect to m !

$$\cos \theta_{nm} = \cos \theta \cos \theta_0 + \sin \theta \sin \theta_0 \cos \phi$$

- azimuthal angle appears with new

$$\lambda = \lambda_0 \frac{2 - 3 \sin^2 \theta_0}{2 + \lambda_0 \sin^2 \theta_0}$$

- λ_0 - invariant!

$$\nu = \lambda_0 \frac{2 \sin^2 \theta_0}{2 + \lambda_0 \sin^2 \theta_0}$$

Кинематика азимутальной асимметрии в полярной системе координат.

Generalized Lam-Tung relation



- Relation between coefficients (high school math sufficient!)

$$\lambda_0 = \frac{\lambda + \frac{3}{2}\nu}{1 - \frac{1}{2}\nu}$$

- Reduced to standard LT relation for transverse polarization ($\lambda_0 = 1$)
- LT (physical meaning originally unclear) - contains two very different inputs: kinematical asymmetry+transverse polarization
- Rederived in 10's: P. Faccioli, C. Lourenco, J. Seixas, and H. K. Wohri, The European Physical Journal C 69, 657 (2010).
- J.-C. Peng: Non-coplanarity – violation of LT

Обсуждается обобщенное соотношение Лама-Тунга, которое характеризует угловые асимметрии дилептонов Дрелла-Яна. Кинематическая азимутальная асимметрия может проявляться для дилептонов, образующихся в кварк-глюонной плазме и адронных средах, их полярная угловая асимметрия может отличаться и является довольно чувствительной к механизму рождения..

Recent activity (triggered by CMS measurement of Z decay angular distribution)



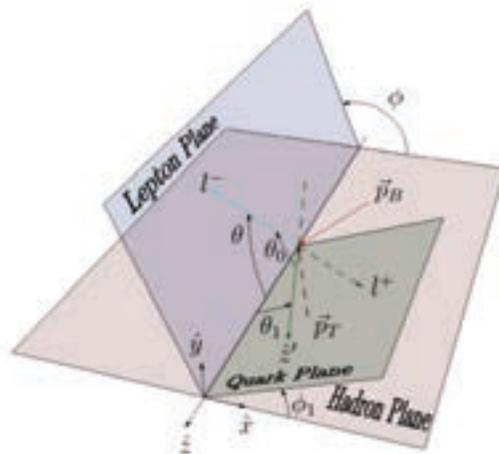
- 1) Lepton angular distributions of Drell-Yan process in pQCD and a geometric approach
By Wen-Chen Chang, Randall Evan McClellan, Jen-Chieh Peng, Oleg Teryaev.
arXiv:0907.1159 [hep-ph]
- 2) Lepton angular distribution of Z boson production and jet discrimination
By Jen-Chieh Peng, Wen-Chen Chang, Randall Evan McClellan, Oleg Teryaev.
arXiv:0907.1048 [hep-ph]
- 3) Rotation invariant observables as Density Matrix invariants
By Margarita Savitskaya, Oleg Teryaev.
arXiv:0911.0402 [hep-ph]
<https://arxiv.org/abs/0911.0402>
Phys.Rev. D79 (2009) no.7, 074013.
- 4) Lepton Angular Distributions of Fixed-target Drell-Yan Experiments in Perturbative QCD and a Geometric Approach
By Wen-Chen Chang, Randall Evan McClellan, Jen-Chieh Peng, Oleg Teryaev.
arXiv:0811.0329 [hep-ph]
<https://arxiv.org/abs/0811.0329>
Phys.Rev. D79 (2009) no.1, 014022.
- 5) On the rotational invariance and non-invariance of lepton angular distributions in Drell-Yan and quarkonium production
By Jen-Chieh Peng, David Boer, Wen-Chen Chang, Randall Evan McClellan, Oleg Teryaev.
arXiv:0808.2476 [hep-ph]
<https://arxiv.org/abs/0808.2476>
Phys.Lett. B784 (2010) 294-298.
- 6) Dependence of lepton angular distribution coefficients on the transverse momentum and rapidity of Z boson produced in hadron collisions at the LHC
By Wen-Chen Chang, Randall Evan McClellan, Jen-Chieh Peng, Oleg Teryaev.
arXiv:0708.0367 [hep-ph]
<https://arxiv.org/abs/0708.0367>
Phys.Rev. D76 (2007) no.3, 034026.
- 7) Interpretation of Angular Distributions of Z boson Production
By Jen-Chieh Peng, Wen-Chen Chang, Oleg Teryaev, Randall McClellan.
<https://arxiv.org/abs/0703.1374>
PLB-628(2006)1-10.
- 8) Interpretation of Angular Distributions of Z boson Production at Colliders
By Jen-Chieh Peng, Wen-Chen Chang, Randall Evan McClellan, Oleg Teryaev.
arXiv:0211.0852 [hep-ph]
<https://arxiv.org/abs/0211.0852>
Phys.Lett. B578 (2004) 284-288.

Недавняя активность, вызванная измерением угловых распределений распада Z бозона на CMS.

Detailed tests of SM at LHC



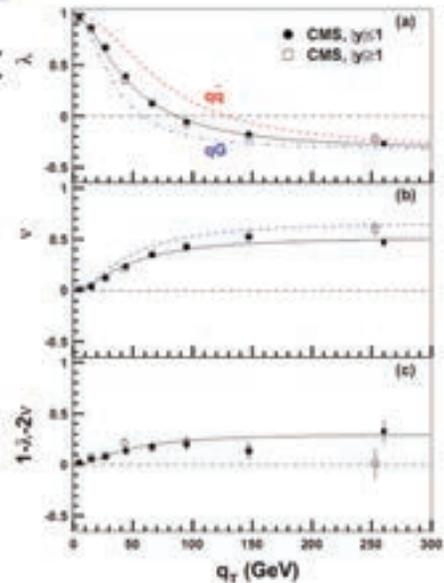
- Interpretation of Angular Distributions of Z-boson Production at Colliders; Jen-Chieh Peng, Wen-Chen Chang, Randall Evan McClellan, and Oleg Teryaev; PLB'15
- Geometrical picture
- Non-coplanarity – disbalance of quark and hadron planes



Ведется детальная проверка Стандартной модели на LHC, с использованием угловых распределений при рождении Z бозонов.

CMS (8 TeV) data

- Necessity to account for
- qq - 41.5(1.6)%
- qG - 58.5(1.6)%
- $\langle \cos 2\varphi_1 \rangle = 0.77$



Данные CMS при энергии 8 ТэВ, которые необходимо учитывать при теоретических построениях.

New activity at CMS initiated by I.A. Golutvin

- Ilya Gorbunov: 13 TeV data+ dilepton mass apart of Z peak + e/μ + modeling of various subprocesses + test of the absence of new ($\cos^4\Theta...$) terms...
- New option: angular distribution of missed transverse momenta (\sim spin of unseen particles)

Новая активность, инициированная И.А. Голутвиным на CMS. Моделирование различных процессов при энергии 13 ТэВ и изучение угловых распределений по недостающему поперечному импульсу (спин невидимых частиц).



■ **HAPPY
BIRTH DAY, dear
Igor Anatol'evich!**

С днем рождения, дорогой Игорь Анатольевич!

И.М. Дрёмин

*Главный научный сотрудник, заведующий
лабораторией физики высоких энергий Физического
института им. П. Н. Лебедева РАН*



Ультрапериферические ядерные взаимодействия: эксперимент и теория

**Ultraperipheral nuclear collisions:
experiment and theory**

I.M. Dremin

Lebedev Physical Institute, Moscow

To the 85th anniversary of I. Golutvin,
Dubna, 08.08.2019

Ультрапериферические ядерные взаимодействия: эксперимент и теория.

ULTRAPERIPHERAL \equiv LARGE IMPACT PARAMETERS

$b > 2R_A$ - unmeasurable!

Measure fiducial cross section and compare with theory!

Interactions of ions colliding at large impact parameters proceed as the interaction of photons from the electromagnetic clouds surrounding both ions.

E. Fermi, Z.Physik 29, 315 (1924)

C.F.V. Weizsäcker, Z.Physik 88, 612 (1934)

L.D. Landau, E.M. Lifshitz, Phys.Zs.Sowjet 6, 244 (1934)

NOTE: 2019-1934=85 - the **IG**-birthday present!

E.J. Williams, Kgl. Danske Vidensk. Selskab. Mat.-Fiz. Medd. 13, 4 (1935)

LL (1934) $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$

M. Vysotsky, E. Zhemchugov, arXiv:1806.07238 (ATLAS)

$\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ - purely electromagnetic interactions!

D. d'Enterria, arXiv:1808.03524 (CMS)

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ (e- and q-loops)

I.M. Dremin, arXiv:1903.12377

$\gamma\gamma \rightarrow R$ (hadron resonance!), i.e. $\gamma\gamma \rightarrow q\bar{q}$

Взаимодействие ионов, сталкивающихся при больших параметрах удара, происходит как взаимодействие фотонов из электромагнитных облаков, окружающих оба иона.

Asymptotics and preasymptotics.

LL $\sigma \propto \ln^3 \gamma \rightarrow$ asymptotics ($\gamma = E/m$)

D $\sigma \propto \ln^3 \frac{\gamma}{2R_{AmR}} \rightarrow \gamma > 2R_{AmR}$ - pre

VZh $\sigma \propto \ln^3 \frac{\bar{q}\gamma}{\omega} \rightarrow \gamma > \omega/\bar{q}$ - pre

(\bar{q} defined by nuclear formfactors, i.e. by R_A)

The most fascinating common feature is the rather fast increase of the cross section with increasing energy as $\ln^3 s$. The growth of the photon flux density at low photon frequencies is its main source. It overshoots the famous Froissart bound $\ln^2 s$ for increase of hadronic cross sections. The long-range electromagnetic forces admit such a possibility.

Preasymptotics (ignored by LL!) is determined by factors inside logarithms. It depends on the fiducial cuts!

Наиболее интересной общей особенностью является довольно быстрое увеличение поперечного сечения с увеличением энергии.

Theory.

The photon flux dn/dx is dominated by photons carrying small fractions of the nucleon energy x :

$$\frac{dn}{dx} = \frac{2Z^2\alpha}{\pi x} \ln \frac{1}{4R_A x m},$$

where the ion radius is R_A (≈ 7 fm for Pb), Z is its charge and m is a nucleon mass. Large Z !

The exclusive cross section of production of a resonance R by the two-photon interactions $A + A = A + (\gamma\gamma \rightarrow R) + A$ may be written as

$$\sigma_{AA}(R) = \int dx_1 dx_2 \frac{dn}{dx_1} \frac{dn}{dx_2} \sigma_{\gamma\gamma}(R),$$

Теория. В потоке фотонов dn/dx преобладают фотоны, несущие малые доли энергии нуклона.

The cross section of $\gamma + \gamma \rightarrow R$:

$$\sigma_{\gamma\gamma}(R) = \frac{8\pi^2 \Gamma_{tot}(R)}{m_R} Br(R \rightarrow \gamma\gamma) Br_d(R) \delta(x_1 x_2 s_{nn} - m_R^2).$$

Here m_R is the mass of R , $\Gamma_{tot}(R)$ its total width and $Br_d(R)$ denotes the branching ratio to a considered channel of its decay. The δ -function approximation is used for resonances with small widths compared to their masses.

The integrals can be easily calculated so that one gets the analytical formula

$$\sigma_{AA}(R) = \frac{128}{3} Z^4 \alpha^2 Br(R \rightarrow \gamma\gamma) Br_d(R) \frac{\Gamma_{tot}(R)}{m_R^3} \ln^3 \frac{\sqrt{s_{nn}}}{4R_A m m_R}.$$

Аппроксимация δ – функцией используется для резонансов с малой шириной по сравнению с их массой.

Experiment.

d'E Evidence for light-by-light (LbL) scattering, $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$, in ultraperipheral PbPb collisions at a nucleon-nucleon center-of-mass energy of 5.02 TeV is reported. LbL scattering processes are selected in events with just two photons produced, with transverse energy $E_T^\gamma > 2$ GeV, pseudorapidity $|\eta^\gamma| < 2.4$; and diphoton invariant mass $m^{\gamma\gamma} > 5$ GeV, transverse momentum $p_T^{\gamma\gamma} < 1$ GeV, and acoplanarity < 0.01 . After all selection criteria, 14 events are observed, compared to 11.1 ± 1.1 (theo) and 3.8 ± 1.3 (stat) events expected for signal and background processes respectively. The significance of the signal excess over the background-only hypothesis is 4.1σ . The measured fiducial LbL scattering cross section, 122 ± 469 (stat) ± 29 (syst) ± 4 (theo) nb is consistent with the standard model prediction.

Эксперимент.

Представлены доказательства рассеяния света на свете в ультрапериферических Pb+Pb столкновениях при энергии в системе центра масс 5,02 ТэВ. После выполнения всех критериев отбора наблюдается 14 событий, указывающих на этот эффект.

VZh Equivalent photon approximation is used to calculate fiducial cross sections for dimuon production in ultraperipheral proton-proton and lead-lead collisions. Analytical formulae taking into account experimental cuts are derived. The results are compared with the measurements reported by the ATLAS collaboration.

Predict $\sigma = 34.4 \mu\text{b}$ at 5.02 TeV with 3 fiducial cuts on invariant mass of $\mu^+\mu^-$ pair, the muon transverse momentum and muon pseudorapidity.

Agrees with ATLAS data (PbPb, $32.2 \pm 0.34 \pm 3.5 \mu\text{b}$).

pp is OK also (with $\sigma \approx 3 \text{ pb}$).

Parameter $\bar{q} \propto 1/R_A$ (pp-200 MeV; PbPb-20 MeV at 0.8 fm \rightarrow 7 fm); $\omega \propto m_R$

Estimates of the resonance cross sections

D PbPb($\gamma\gamma$) \rightarrow PbPbR

π^0 : $\sigma_{AA} = 15.2 \text{ mb}$ at 2.76 TeV (22 mb at 5.02 TeV)

$\eta' \rightarrow \rho^0 + \gamma$: $\sigma_{AA} = 1.6 \text{ mb}$ at 2.76 TeV (2.8 mb at 5.02 TeV).

Strong condition - impact parameter $b > 19 \text{ fm}$

Приближение эквивалентных фотонов используется для расчета сечений образования димюонов в ультрапериферических протон-протонных и свинец-свинцовых столкновениях.

Conclusions

- The cross sections of ultraperipheral processes increase as $\ln^3 s$ at asymptotically high energy s .
- **Preasymptotics depends on fiducial cuts.**
- Comparison with experimental data on LbL-scattering (CMS) and with ATLAS data on $\mu^+\mu^-$ production in pp and PbPb collisions shows good agreement.
- **The estimated values of the cross sections for ultraperipheral production of resonances are quite optimistic for high energy experiments at RHIC and LHC.**
- **Fiducial cuts strongly diminish the measured values of the cross sections. Their impact on possible experimentation at NICA should be carefully studied.**

Оценочные значения сечений ультрапериферийного образования резонансов весьма оптимистичны для экспериментов при высоких энергиях на RHIC и LHC.

Встречи с друзьями и коллегами



Игорь Анатольевич Голутвин с супругой Инной Георгиевной,
сыном Андреем Игоревичем и ректором МАИ академиком РАН
Юрием Алексеевичем Рыжовым



Игорь Анатольевич с нобелевским лауреатом К. Руббиа,
генеральным директором ЦЕРН в 1989–1993 гг.



И. А. Голутвин с директором ОИЯИ академиком РАН В. Г. Кадышевским



Игорь Анатольевич с Мишелем Делла Негра
(руководителем CMS в 1992–2006 гг.)



Н. М. Шумейко (полномочный представитель Правительства Республики
Белоруссии в ОИЯИ) и И. А. Голутвин



Профессор П. В. Сорокин (Украина), Э. Э. Боос (профессор НИИЯФ МГУ)
и И. А. Голутвин



Профессор С. В. Русаков (ФИАН) с Игорем Анатольевичем



Директор ОФВЭ ПИЯФ А. А. Воробьев поздравляет Игоря Анатольевича с юбилеем



Слева направо: И. А. Голутвин, И. Г. Голутвина,
В. Г. Кадышевский, Р. В. Матвеева



Главный конструктор НИКИЭТ В. П. Сметанников и сотрудник НИКИЭТ
А. Н. Орлов вручают памятную награду И. А. Голутвину



И. А. Голутвин с руководителем коллаборации CMS Тициано Кампорези



Игорь Анатольевич и профессор Л. Б. Литов (Болгария)



Президент Академии наук Узбекистана Б. С. Юлдашев с И. А. Голутвиным



Профессор Томас Мюллер (Карлсруэ, Германия)
поздравляет И. А. Голутвина с юбилеем



Обсуждение с Павлом де Барбаро (Рочестерский университет, США)



Дискуссия с академиком РАН М. В. Даниловым



Слева направо: И. А. Голутвин , профессор И. Ванков (Болгария)
и академик РАН В. А. Матвеев



И. А. Голутвин, А. В. Зарубин (начальник отдела ОИЯИ)
и профессор А. Скуджа (США)



Академик РАН Ю. Ц. Оганесян и И. А. Голутвин на установке CMS в ЦЕРН



Игорь Анатольевич и Гвидо Тонелли (Италия) —
руководитель CMS в 2010–2011 гг.



Профессор ФИАН А. И. Лебедев беседует с И. А. Голутвиным



И. А. Голутвин , В. А. Матвеев и Э. Э. Боос в Самарканде



Главный специалист НПО «Алмаз» Е. И. Никифоров с И. А. Голутвиным



Профессор И. А. Голутвин и профессор А. И. Малахов
на совещании в Ташкенте



Сотрудник газеты «Поиск» С. В. Беляева и молодой физик И. Н. Горбунов (ОИЯИ) беседуют с Игорем Анатольевичем



Слева направо: ректор Самаркандского университета Р. И. Холмуродов, И. А. Голутвин, академик В. А. Матвеев



И. А. Голутвин и директор УНЦ ОИЯИ С. З. Пакуляк



П. де Барбаро, И. А. Голутвин и Р. Рухти (университет Нотр-Дам, США)



Ведущий конструктор CMS Ю. В. Ершов с И. А. Голутвиным



М. Делла Негра, К. Аспола и И. А. Голутвин



Д. Инкандела (руководитель CMS в 2012–2013 гг.) и И. А. Голутвин



Член-корреспондент РАН Д. С. Горбунов и И. А. Голутвин



Г. Тонелли с супругой и И. А. Голутвин в Ташкенте



И. Г. Голутвина, И. А. Голутвин и Б. С. Юлдашев в Ташкенте



Встреча руководства коллаборации CMS с группой участников из ЛФВЭ ОИЯИ. Слева направо стоят: С. В. Афанасьев, И. А. Голутвин, Р. Карлин (ЦЕРН), А. Петрилли (ЦЕРН), Ю. В. Ершов; сидят: А. И. Малахов, А. В. Зарубин



Исполнительный директор Российской академии инженерных наук А. А. Собко вручает И. А. Голутвину орден им. А. М. Прохорова I степени



Встреча в Дубне с лидерами CMS 25 июля 2018 г.



17-я конференция RDMS CMS в Дубне



И. А. Голутвин
с М. Делла Негра
на установке CMS в ЦЕРН



И. А. Голутвин с сокурсником
по МФТИ П. В. Зарубиным



И. А. Голутвин с руководством АО «Концерн ВКО „Антей-Алмаз“».
Справа — сокурсник по МФТИ Е. М. Сухарев



Игорь Анатольевич с супругой Инной Георгиевной

Научное издание

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ФИЗИКИ ЧАСТИЦ

Труды научного семинара, посвященного
85-летию профессора И. А. Голутвина

2021-42

Отпечатано с файлов, предоставленных авторами.

Подписано в печать 12.11.2021.

Формат 60 × 84/8. Усл. печ. л. 12,09. Уч.-изд. л. 12,8. Тираж 335. Заказ № 60273.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6
E-mail: publish@jinr.ru
www.jinr.ru/publish/